

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E
AMBIENTALE

Dottorato in Ingegneria dei Sistemi Idraulici, di
Trasporto e Territoriali (XXVIII Ciclo)



Città e clima: forma urbana e adattamento ai cambiamenti climatici

Carlo Gerundo

Tutor

Prof. Marialuce Stanganelli

Coordinatore del Dottorato

Prof. Elvira Petroncelli

Co-Tutor

Prof. Elvira Petroncelli

Sommario

INTRODUZIONE - Dichiarazione del campo di indagine della tesi e degli obiettivi.....	5
PARTE I.....	11
CAPITOLO 1 - Il ruolo del clima nella costruzione della forma delle città	13
Il clima	13
I fattori climatici.....	14
Radiazione solare.....	15
Temperatura dell'aria	17
Umidità dell'aria	19
Ventilazione	20
Condizioni del cielo.....	21
Precipitazioni	22
Fattori meso e micro-climatici.....	22
Clima e insediamenti urbani.....	25
CAPITOLO 2 - Il Cambiamento Climatico	33
Alcuni numeri sul <i>climate change</i>	33
Cause del <i>climate change</i> e responsabilità degli insediamenti urbani	34
Principali effetti attesi e rischi per le città	36
CAPITOLO 3 - Strategie di contrasto al <i>climate change</i>	41
Mitigazione e adattamento.....	41
La Strategia Europea di Adattamento ai cambiamenti climatici	43
La Strategia Nazionale di Adattamento al <i>climate change</i>	47
PARTE II	51
CAPITOLO 4 - Il clima urbano	53
Premessa.....	53
Struttura dello strato limite atmosferico	53
Alterazione del profilo del vento	55
Alterazione del bilancio di calore e del bilancio radiativo alla superficie	57
CAPITOLO 5 - L'isola di calore urbana	65
Cenni storici	65

Definizione	66
Tipologie	67
Cause ed effetti	70
Geometria urbana	72
Spazi verdi.....	75
Proprietà dei materiali urbani.....	76
Principali strategie di mitigazione dell'isola di calore urbana	77
Incidenza dell'isola di calore urbana sul <i>climate change</i>	79
Prospettive future in tema di isola di calore urbana	79
PARTE III	81
Premessa.....	83
CAPITOLO 6 - Le mappe di clima urbano come strumento propedeutico all'adattamento al <i>climate change</i>	85
Introduzione	85
Evoluzione delle UC-Map.....	88
Struttura di una UC-Map	92
Mappa di analisi del clima urbano.....	92
6.5 Mappa delle raccomandazioni per la pianificazione urbanistica	96
Vantaggi nell'impiego di una UC-Map.....	99
Limitazioni alla redazione e all'uso di una UC-Map.....	100
CAPITOLO 7 - Misurare la forma della città per caratterizzare il clima urbano	103
Morfologia urbana e mappe di clima urbano	103
Caratterizzare e misurare la forma della città	105
Forma urbana e clima: gli indicatori significativi.....	109
Parametri topografici.....	110
Indici e rapporti urbanistici.....	111
Ulteriori indici descrittivi dell'ambiente costruito.....	116
Parametri descrittivi del verde urbano	126
Metriche di Landscape Ecology.....	129
CAPITOLO 8 - Redazione di una mappa di adattamento al <i>climate change</i> . Una proposta metodologica	141
PARTE IV	147

CAPITOLO 9 - Aspetti introduttivi	149
Premessa.....	149
Inquadramento territoriale.....	149
Costruzione del <i>database</i>	150
CAPITOLO 10 - Selezione degli indicatori.....	155
Indicatori di morfologia urbana.....	155
Indicatori di configurazione delle aree verdi.....	156
CAPITOLO 11 - Redazione delle mappe del Carico Termico e del Potenziale Dinamico	161
Valutazioni preliminari	161
Mappa del Carico Termico	163
Mappa del Potenziale Dinamico	177
CAPITOLO 12 - Mappa dei climatopi	183
Calibrazione del modello.....	183
Individuazione dei climatopi	186
CAPITOLO 13 - Mappa per l'adattamento climatico al fenomeno delle alte temperature.....	191
Aspetti metodologici e possibili impieghi.....	191
Selezione delle azioni prioritarie per l'adattamento alle alte temperature	193
CONCLUSIONI	199
APPENDICE - Esempio di selezione delle strategie prioritarie	203
ELENCO FIGURE	223
ELENCO TABELLE.....	227
BIBLIOGRAFIA.....	229

INTRODUZIONE - Dichiarazione del campo di indagine della tesi e degli obiettivi

Il cambiamento climatico rappresenta un fenomeno attuale e scientificamente accertato, così come è pressoché certo che la maggior parte del riscaldamento verificatosi a partire dalla metà del XX secolo sia dovuto all'osservato aumento delle concentrazioni di gas serra a causa delle emissioni provenienti dalle attività umane (IPCC, 2013).

Secondo i rapporti internazionali, nei prossimi decenni, la regione Europea e, in particolare, l'area mediterranea dovranno far fronte ad impatti dei cambiamenti climatici particolarmente negativi i quali, combinandosi agli effetti dovuti alle pressioni antropiche sulle risorse naturali, faranno della regione del Mediterraneo una delle aree più vulnerabili d'Europa (EEA, 2012; IPCC, 2007).

Per la prima volta, infatti, negli ultimi decenni, sono stati documentati ampi e diversificati impatti dei cambiamenti climatici attuali sui sistemi naturali ed antropici europei quali la ritirata dei ghiacciai, periodi vegetativi più lunghi, spostamenti degli areali di molte specie animali e vegetali, conseguenze sulla salute umana causate da ondate di calore senza precedenti (IPCC, 2007).

Gli impatti attesi per il XXI secolo sull'area mediterranea sono tra i più intensi e drammatici dell'intero continente. L'innalzamento delle temperature medie e massime condurrà, secondo gli esperti, ad una riduzione della disponibilità di acqua e ad un aumento dei periodi di siccità, con il conseguente possibile calo della produttività agricola e la perdita di ecosistemi naturali e di biodiversità, l'incremento del fabbisogno energetico estivo e del rischio sanitario connesso (IPCC, 2007).

Le grandi aree urbane e le città in generale incidono significativamente sulle cause del cambiamento climatico in quanto in esse si concentrano principalmente le attività responsabili delle emissioni di gas serra. Allo stesso tempo, tuttavia, le città subiscono in maniera rilevante gli effetti del cambiamento climatico; esse rappresentano, dunque, non solo uno dei problemi, ma anche il principale campo di applicazione su cui intervenire per attenuare gli effetti negativi del *Climate Change* (CC).

Per contrastare il fenomeno, già la Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UN, 1992) individuava due strategie: la mitigazione delle sue cause antropiche e l'adattamento ai suoi effetti ambientali; quest'ultima è rimasta, nella pratica, prevalentemente ancorata al dibattito scientifico, in secondo piano rispetto alla prima.

Agire sulle aree urbane risulta essenziale per perseguire con successo l'adattamento al cambiamento climatico. Le aree urbane accolgono più della metà della popolazione mondiale, percentuale destinata a superare il 60% entro il 2030 (Oke, 1987), e la maggior parte del patrimonio edilizio e delle attività economiche. Esse, inoltre, ospitano un'alta percentuale di popolazione e di attività economiche maggiormente esposte al rischio dovuto al cambiamento climatico, che tende a crescere di intensità a causa dell'estrema vulnerabilità e fragilità dei sistemi urbani contemporanei.

Di fronte a queste problematiche i tradizionali modelli e approcci della pianificazione urbanistica si rivelano spesso inappropriati; al contrario, alcuni di essi contribuiscono in larga misura alla crisi climatica che l'umanità si trova ad affrontare (UN-HABITAT 2009).

Gli organi di governo, a vari livelli, cominciano a muovere i primi passi verso l'implementazione di politiche e piani di adattamento e verso l'integrazione delle problematiche inerenti il cambiamento climatico nei modelli di *governance*.

In Europa, la politica di adattamento è stata sviluppata a tutti i livelli di governo, con strategie di adattamento integrate in alcuni processi di pianificazione quali piani di gestione idrica e dell'erosione costiera, piani di gestione del rischio o in esperienze di pianificazione ambientale e paesaggistica (IPCC, 2014).

Assai meno percorsa, invece, è la strada dell'integrazione delle azioni di adattamento all'interno di politiche e processi di pianificazione urbanistica e di uso del suolo, sebbene l'attuazione delle previsioni di tale livello di pianificazione consenta di incrementare efficacemente la capacità adattativa delle città agli impatti del cambiamento climatico.

L'integrazione delle strategie di adattamento nella pianificazione urbanistica è spesso limitata ad una generica formulazione di indicazioni che talvolta

difettano di modelli e strumenti per far sì che le stesse siano messe in pratica (Mickwitz et al., 2009; Swart et al., 2009). Inoltre, il maggiore ostacolo alla costruzione di una *governance* dell'adattamento ai cambiamenti climatici attraverso la pianificazione urbanistica è la mancanza di quadri istituzionali chiari, non conflittuali e gerarchicamente coerenti.

L'adattamento al *climate change*, infatti, è spesso derubricato a questioni come la gestione idrica o gli allagamenti causati dallo straripamento dei corpi idrici. In tal modo non è tenuto in debita considerazione il fondamentale contributo che la pianificazione urbanistica è in grado di fornire ad una strategia di adattamento al cambiamento climatico (Mickwitz et al., 2009; Van Nieuwaal et al., 2009).

Gli sforzi della ricerca in tema di governo della città e del territorio, invece, si sono per lo più concentrati nella definizione di teorie e protocolli operativi per la mitigazione del clima e per il controllo dei consumi energetici (Heidrich et al., 2013).

Al fine di perseguire efficacemente l'adattamento delle città al *climate change* si rende necessario un ripensamento di alcuni fondamenti della disciplina urbanistica, ripensamento che può avvenire solo riconoscendo il ruolo cruciale che la forma e la funzione degli insediamenti urbani ricoprono nel processo di alterazione del clima e, di conseguenza, nella determinazione della capacità adattativa delle città stesse.

La topografia, la densità, gli usi e l'epoca di costruzione prevalente degli edifici, l'orientamento delle strade, la quantità degli spazi non edificati e vegetati e la loro distribuzione all'interno dei tessuti insediativi rappresentano tutti fattori capaci di influenzare in maniera rilevante il microclima urbano. Ciononostante, nell'analisi delle caratteristiche climatiche di un dato territorio la configurazione dello spazio costruito è tenuta limitatamente in conto.

Allo stesso modo, il percorso verso città più sostenibili, sicure e confortevoli dovrebbe essere supportato includendone le specificità climatiche nei processi di pianificazione urbanistica al fine di programmare azioni consapevoli capaci di minimizzare gli effetti negativi e massimizzare i benefici derivanti da specifiche condizioni climatiche. Tuttavia, è ancora raro includere tra i quadri conoscitivi

propri delle analisi urbanistiche i livelli informativi che afferiscono alla climatologia urbana.

Le ragioni del fallimento dell'integrazione tra le tematiche legate al clima e la prassi urbanistica sono numerose. La bassa priorità data ai fattori climatici nei processi di pianificazione urbanistica è probabilmente da ricondurre alla difficoltà di trasferire le conoscenze scientifiche della climatologia urbana in metodi che possano essere prontamente assunti dai pianificatori per redigere gli strumenti urbanistici. A ciò si aggiunge l'estrema eterogeneità dei contesti urbani che, di fatto, rendono difficoltoso applicare soluzioni metodologiche implementate per uno specifico contesto ad un altro completamente differente (Mills, 2015).

Appare perciò indispensabile orientare gli sforzi della ricerca in campo urbanistico verso efficaci soluzioni per trasferire le conoscenze climatiche nel linguaggio della pianificazione e del governo del territorio (Eliasson, 2000; Alcoforado et al., 2009).

Ciò è possibile solo rafforzando il bagaglio culturale del pianificatore, stabilendo solide interconnessioni con la climatologia urbana con l'obiettivo di costruire un nuovo linguaggio capace di considerare le relazioni intercorrenti tra la forma delle città e le strategie di adattamento ai cambiamenti climatici da mettere in essere.

A partire dagli anni '70, numerose ricerche congiunte di urbanisti e climatologi hanno tentato di formalizzare metodi per redigere analisi climatiche a varie scale e rappresentarle su cartografie tematiche bidimensionali, definite *Mappe di clima urbano* (UC-Map).

Tuttavia, la ricerca scientifica in materia di mappatura del clima urbano non ha ancora contemplato una metodologia di analisi dell'ambiente costruito che tenga conto compiutamente dei molteplici aspetti della morfologia urbana aventi maggiore incidenza sul comfort termico. Tali aspetti, infatti, sono solitamente presi in considerazione separatamente, in relazione ai soli fattori climatici sui quali incidono maggiormente.

L'eterogeneità spaziale dei tessuti insediativi delle città impone la necessità di superare i tradizionali meccanismi di analisi e di valutare la morfologia urbana

selezionando accuratamente indicatori capaci di descrivere i fattori che influenzano il clima urbano.

Il lavoro di ricerca presentato nelle pagine successive è consistito nell'implementazione di un percorso metodologico e operativo di supporto al processo di pianificazione capace di indagare le relazioni intercorrenti tra la morfologia dei tessuti insediativi e le caratteristiche del clima urbano in aree densamente edificate e di formalizzare per gli stessi strategie di intervento sulla morfologia urbana, al fine di perseguire l'adattamento della città ai cambiamenti climatici, con particolare riferimento alle anomalie termiche.

Il risultato della metodologia è rappresentato da una Mappa per l'adattamento al *climate change* distinta in due principali elaborazioni: una mappa di analisi e una mappa delle azioni di progettazione urbanistica orientate all'adattamento delle aree urbane ai cambiamenti climatici, dettagliate per differenti ambiti insediativi, con riferimento non solo alla nuova edificazione, ma soprattutto ai contesti consolidati in cui risulta più complesso ma assolutamente prioritario intervenire.

Il presente lavoro di ricerca è strutturato in tre fasi – conoscitiva, metodologica, applicativa.

La fase conoscitiva è sviluppata nelle prima due Parti della tesi che contengono un resoconto della letteratura scientifica per quanto attiene al ruolo assunto dal clima nella costruzione degli insediamenti urbani, al *climate change* e ai suoi impatti sulla città, alle strategie per contrastarlo.

La terza Parte enuclea l'aspetto metodologico della problematica, individuando le tecniche e metodi di mappatura del clima urbano e le caratteristiche della morfologia urbana aventi influenza diretta sul clima della città, cui corrisponde un insieme di indicatori opportunamente scelti, che trova nell'ultima parte uno specifico momento applicativo.

La quarta Parte contiene l'applicazione della metodologia al caso studio dell'area metropolitana di Napoli. Tale sperimentazione è stata effettuata organizzando i dati raccolti in un database geografico e processando gli stessi in ambiente GIS. Gli output sono stati esaminati con tecniche di correlazione statistica e di analisi statistica multivariata, che hanno consentito di individuare

delle unità omogenee di risposta climatica, contraddistinte da caratteristiche dei tessuti urbani determinanti simili livelli di suscettibilità alle alte temperature.

I risultati derivanti da tale sperimentazione hanno permesso di costruire, per il contesto di analisi scelto, elaborazioni sintetiche delle strategie di intervento per l'adattamento ai cambiamenti climatici e indicazioni per la progettazione urbana calibrate rispetto a ciascuna unità individuata.

PARTE I

Clima e cambiamenti climatici



CAPITOLO 1 - Il ruolo del clima nella costruzione della forma delle città

Il clima

Con il termine *clima* (dal greco “klima”) si intende l'insieme delle condizioni medie atmosferiche che si manifestano in una certa area geografica per un periodo di tempo che va dai 30 ai 100 anni.

Tale definizione non è da confondere con quella di *tempo atmosferico*, termine con cui si definisce il complesso delle condizioni meteorologiche – temperatura, pressione, umidità, che sono responsabili dei venti, della copertura nuvolosa e delle precipitazioni – che caratterizzano la troposfera, lo strato più basso dell'atmosfera, in un dato luogo, in un intervallo di tempo breve. La scienza che studia il tempo atmosferico è detta meteorologia.

La climatologia, invece, è la scienza che studia i vari fattori che determinano il clima (attingendo le informazioni dalla meteorologia) i reciproci rapporti tra gli stessi, la loro influenza sull'ambiente fisico e biologico e le variazioni che subiscono in relazione alle condizioni geografiche.

La climatologia propone delle classificazioni in grado di associare climi con caratteristiche omogenee, tra le quali risulta ancora valida quella proposta da Köppen (1936) e successivamente modificata da altri studiosi. In questa classificazione Köppen distingue undici tipi di climi regionali principali che corrispondono alle grandi associazioni vegetali presenti sulla Terra, raggruppati in cinque grandi gruppi, indicati con le lettere dell'alfabeto (maiuscole) da A ad E, dall'Equatore verso i Poli, che si differenziano in base alla quantità e alla distribuzione delle precipitazioni nell'arco dell'anno:

- A. *climi megatermici umidi o tropicali umidi*, in cui la temperatura media del mese più freddo è superiore a 15 °C;
- B. *climi aridi*;
- C. *climi mesotermici o temperati delle medie latitudini*, in cui la temperatura media del mese più freddo è compresa tra 2 e 15 °C;

- D. *climi microtermici umidi o freddi delle medie latitudini* in cui la temperatura media del mese più freddo è uguale o inferiore a -2°C e la temperatura media del mese più caldo è uguale o superiore a 10°C ;
- E. *climi nivali o polari* in cui la temperatura del mese più caldo è inferiore a 10°C .

Il clima è anche classificato in funzione della scala in tre livelli:

- 1) *macroclima*, è la situazione media che si determina in una ampia regione, in dipendenza alquanto stretta da fattori geografici quali latitudine, longitudine, lontananza da mari e oceani; la dimensione spaziale del macroclima è di migliaia di chilometri quadrati e nel suo insieme presenta delle notevoli diversità;
- 2) *mesoclima o topoclima*, definito anche come clima di bacino, si sviluppa su una lunghezza lineare orizzontale di alcuni chilometri e centinaia di metri in verticale, e concerne le variazioni che il macroclima subisce a livello regionale, soprattutto in relazioni a locali condizioni topografiche
- 3) *microclima*, relativo a fenomeni climatici peculiari di aree di esigua estensione per cui lo spessore dello strato d'aria preso in esame è pari allo sviluppo verticale dei volumi che contornano il sito.

Alcuni autori propongono una suddivisione in quattro livelli in cui tra meso e microclima si colloca un ulteriore livello definito *clima locale*, con un'estensione superficiale compresa tra i 100 metri e i 50 chilometri.

I fattori climatici

I fattori che determinano l'esistenza di un dato clima in una regione del globo sono di carattere astronomico e di carattere geografico. Essi agiscono sull'atmosfera terrestre e sui fenomeni che ivi si generano quali radiazione solare, temperatura dell'aria, pressione atmosferica, umidità dell'aria, precipitazioni, ventilazione, utilizzati dagli studiosi per descrivere il clima.

I moti terrestri, unitamente ad altri fattori astronomici quali la *forma ellittica dell'orbita*, l'*inclinazione dell'asse* e la *forma sferica del pianeta*, determinano il cambiamento delle stagioni, la variazione nel corso dell'anno della durata del

giorno e della notte e, dunque, una diversa distribuzione dell'energia solare sulla superficie terrestre.

La quantità di energia solare che incide in un certo luogo dipende dal momento dell'anno e dalla latitudine, parametro fondamentale ma non sufficiente a caratterizzare il clima di una regione. Di fatti, luoghi con la stessa latitudine possono presentare climi con differenze sostanziali, determinate da fattori geografici locali quali la presenza di masse d'acqua o di masse terrestri, la presenza di sistemi montuosi e il loro orientamento, la specifica topografia del luogo, la natura del terreno e l'eventuale presenza di estese superfici vegetate. L'esistenza di aree urbanizzate è, altresì, una variabile che incide sulle caratteristiche climatiche di un sito per ragioni che saranno approfondite dettagliatamente nei paragrafi successivi.

Come in precedenza accennato, i principali fattori impiegati per descrivere il clima sono la *temperatura* e l'*umidità relativa* dell'aria, l'andamento delle *precipitazioni meteoriche*, la *ventilazione*, la *copertura del cielo*, l'*intensità della radiazione solare*. Per descrivere tali grandezze in maniera statisticamente significativa, ovvero effettivamente rappresentativa del complesso sistema delle condizioni ambientali, si utilizzano valori mediati su un periodo generalmente non inferiore a 20-30 anni.

Si intende fornire, di seguito, una sintetica descrizione dei fattori in precedenza elencati con l'obiettivo di agevolare il lettore nella comprensione degli argomenti trattati nei paragrafi successivi.

Radiazione solare

Il sole irradia energia nello spazio e la quantità media di energia solare che incide ortogonalmente, nell'unità di tempo, su una superficie unitaria posta al di fuori dell'atmosfera, detta *costante solare*, assume il valore medio di 1353 W/m².

L'intensità della radiazione solare si attenua nel passaggio attraverso l'atmosfera, in quanto una parte di essa è riflessa verso lo spazio, una parte è diffusa in tutte le direzioni dalle molecole dei gas atmosferici e dal vapore acqueo, una parte viene assorbita dalle molecole dell'atmosfera e da queste riemessa come radiazione infrarossa (Figura 1).

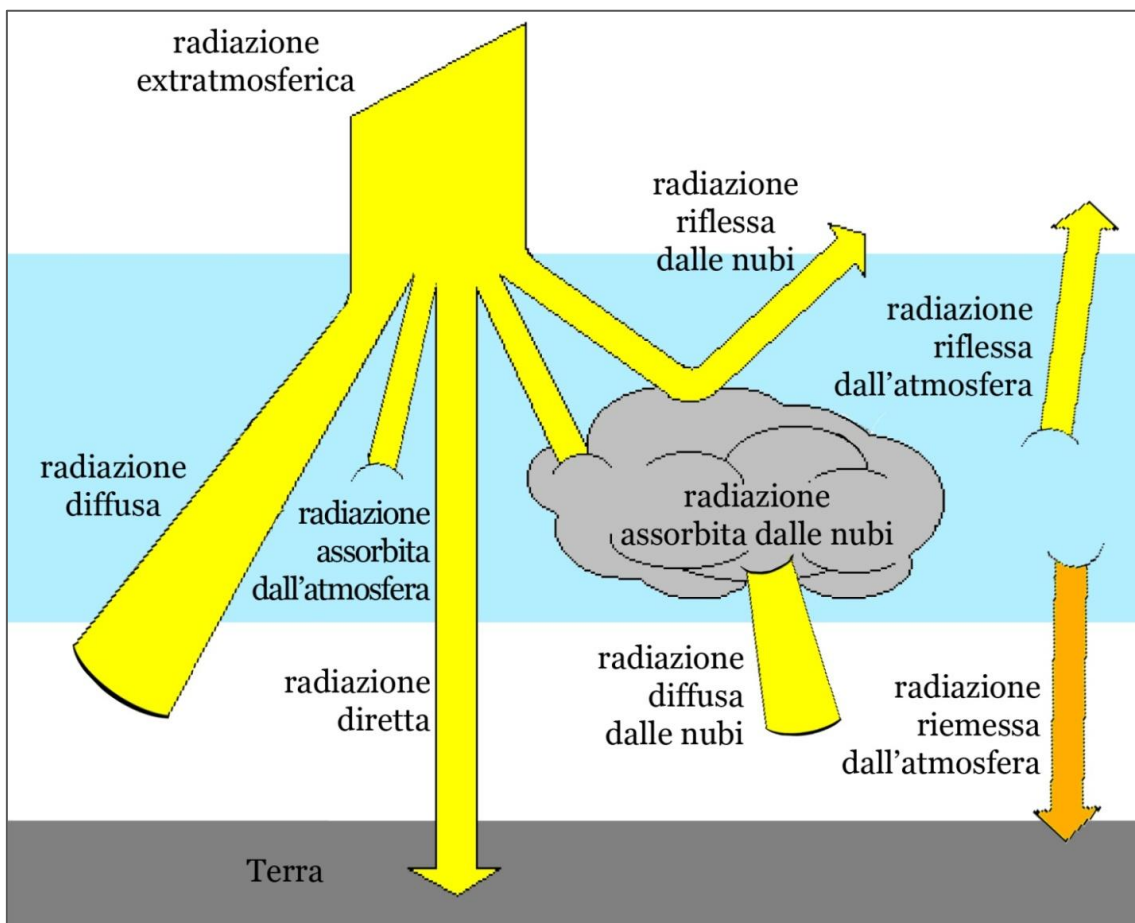


Figura 1 - Distribuzione della radiazione solare nel passaggio attraverso l'atmosfera.

La radiazione solare, dunque, arriva sulla superficie terrestre scomposta in una componente *diretta*, che giunge direttamente dal sole secondo una direzione ben definita, e in una componente *diffusa*, omnidirezionale. La somma delle radiazioni diretta e diffusa viene indicata come *radiazione globale*.

Il rapporto tra radiazione diffusa e radiazione diretta, come è facile intuire, dipende essenzialmente dalla copertura del cielo. Al suolo giungerà una quantità maggiore di radiazione diretta tanto più il cielo è sereno. Viceversa, in condizioni di cielo coperto la terra sarà irradiata prevalentemente da radiazione diffusa.

La *radiazione solare*, dunque, è esprimibile come l'energia solare diretta e diffusa incidente su un'unità areale piana.

Da un punto di vista quantitativo la radiazione incidente viene espressa in termini di potenza incidente per unità di superficie [W/m^2], ed è anche detta *irradianza*.

Un altro modo per esprimere la radiazione solare è in termini di energia incidente per unità di superficie in un certo intervallo di tempo [J/m^2 oppure kWh/m^2], anche conosciuta come *irraggiamento*.

Va precisato che l'intensità della radiazione solare su di una superficie dipende dall'angolo di incidenza. L'intensità della radiazione sarà maggiore su una superficie perpendicolare alla sua direzione di propagazione.

Per tale ragione l'intensità della radiazione solare subisce variazioni sostanziali a seconda della latitudine del luogo¹, della stagione², dell'ora del giorno³ e delle condizioni atmosferiche. Essa rappresenta una variabile fondamentale nella descrizione del clima in quanto determina se un luogo è interessato da alte temperature o è prevalentemente freddo.

Temperatura dell'aria

La *temperatura dell'aria* è definita come andamento dei valori medi su scala mensile dei valori minimi e massimi giornalieri, ed è generalmente espressa in °C. La temperatura di un dato luogo è dipendente, in primo luogo, dalla radiazione solare. Essa è inoltre influenzata dalle condizioni di vento, dalle precipitazioni e da altri fattori locali quali la presenza di zone d'ombra, bacini idrici, vegetazione.

Essa è fortemente variabile nello spazio e nel tempo: in un determinato sito le variazioni caratteristiche della temperatura su scala giornaliera e annuale sono causate dalle condizioni di insolazione. Ne consegue che la temperatura dell'aria sia influenzata dai fattori che incidono sull'intensità della radiazione solare quali copertura del cielo, stagione dell'anno, ora del giorno.

¹ Nella fascia compresa tra i tropici il sole è sempre vicino allo *zenit*, pertanto la radiazione incidente è pressoché ortogonale al suolo. Al crescere della latitudine diminuisce l'inclinazione e con essa l'intensità della radiazione.

² La massima intensità della radiazione solare nel corso dell'anno si ha nella stagione estiva quando il percorso del sole ha massima altezza sull'orizzonte.

³ La radiazione solare in un dato sito ha intensità massima nel corso della giornata quando i raggi incidono sulla superficie terrestre con l'angolo più elevato. Tale condizione si verifica a mezzogiorno.

L'entità della variazione diurna della temperatura dipende dalle condizioni di copertura del cielo. Nei giorni caratterizzati da cielo sereno, infatti, la grande quantità di radiazione solare incidente determina una notevole variazione giornaliera della temperatura dell'aria. L'entità di tale variazione risulta minore nei giorni in cui il cielo è coperto.

Il ciclo di eventi che determina l'aumento di temperatura dell'aria è schematizzabile come di seguito. La radiazione solare, diretta e diffusa, è assorbita dal suolo che si riscalda e riemette calore, scambiandolo per convezione con l'aria che, a sua volta, si riscalda e aumenta di temperatura.

È facile intuire, dunque, come la massima insolazione e il massimo riscaldamento del suolo precedano il raggiungimento della massima temperatura da parte dell'aria.

Al contrario, il picco negativo di temperatura si ha nel frangente di tempo compreso tra le ultime ore della notte e le prime ore del mattino, quando la superficie terrestre, avendo ceduto all'atmosfera tutto il calore accumulato durante il giorno, ha raggiunto i minimi valori di temperatura e quando i raggi solari non hanno ancora iniziato a riscaldarla.

Analogamente, l'inerzia termica del sistema fa sì che, su base annuale, la temperatura dell'aria presenti un punto di massimo circa 30-40 giorni dopo il periodo di massima insolazione, corrispondente al solstizio d'estate (21 giugno) e un punto di minimo circa 30 giorni dopo il solstizio d'inverno (21 dicembre) (Figura 2).

La temperatura dell'aria diminuisce con l'altitudine. L'atmosfera infatti è riscaldata principalmente dal basso per effetto della cessione di calore per irraggiamento da parte del suolo, precedentemente riscaldato dalla radiazione incidente.

L'assorbimento della radiazione infrarossa emessa dalla Terra da parte dell'atmosfera riguarda, come è ovvio, prima gli strati prossimi al suolo poi i successivi più distanti ed è anche tanto maggiore quanto maggiore è la densità dell'aria, che è funzione inversa della quota.

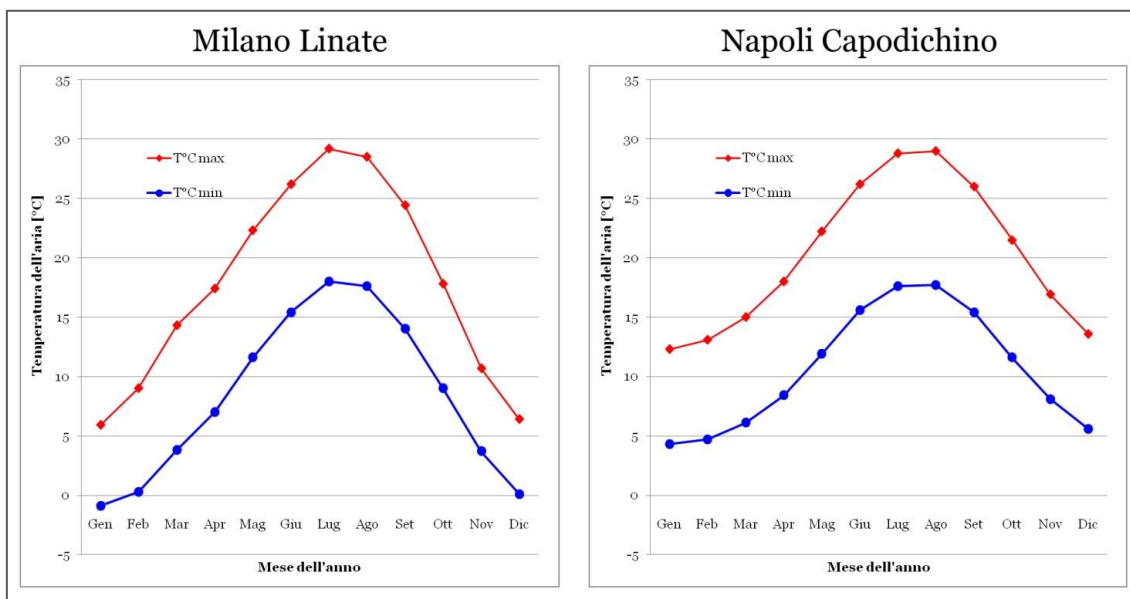


Figura 2 - Andamenti annuali della temperatura per le città di Milano e Napoli. Sono rappresentate le temperature massime e minime mensili ricavate dai dati misurati nel trentennio 1971-2000 rispettivamente nelle stazioni meteorologiche degli aeroporti di Linate e Capodichino.

Allontanandosi dalla fonte di calore, il suolo, la temperatura dell'aria tende a diminuire. Il gradiente termico verticale, ovvero la diminuzione della temperatura per unità di altezza, è mediamente pari a $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ in condizione di stabilità atmosferica, ma può variare sensibilmente in presenza di regimi turbolenti dell'aria o in presenza di forte riscaldamento del suolo, può azzerarsi o addirittura invertirsi (la temperatura aumenta con l'altitudine) nel caso del fenomeno dell'inversione termica.

Umidità dell'aria

L'*umidità dell'aria* è la quantità di vapore acqueo, espressa in grammi, contenuta in un metro cubo d'aria (g/m^3) ad una certa temperatura e pressione. Non essendo espressa in percentuale, è una grandezza difficile da interpretare e per questo si preferisce l'utilizzo dell'*umidità relativa* che, invece, indica il rapporto percentuale tra la quantità di vapore contenuta in una massa d'aria e la quantità massima che il volume d'aria può contenere nelle stesse condizioni di temperatura e pressione. I valori di umidità relativa variano notevolmente nel corso della giornata, essendo massimi all'alba, quando la temperatura dell'aria è a livelli più bassi, e diminuendo all'aumentare della temperatura. La

diminuzione dell'umidità relativa verso mezzogiorno è massima nel periodo estivo, anche se durante il giorno l'azione della radiazione solare porta ad aumentare l'evaporazione dell'acqua presente sulla superficie terrestre contrastando la tendenza alla diminuzione dell'umidità relativa.

Nelle zone con alti livelli di umidità, la trasmissione della radiazione solare è ridotta a causa dell'assorbimento atmosferico e della dispersione.

Ventilazione

La *ventilazione*, intesa come spostamento di masse d'aria dovuto alla differenza di pressione atmosferica, è descritta in termini di direzione di provenienza (in relazione ai punti cardinali), velocità (espressa in m/s) e frequenza (valutata in termini percentuali).

La direzione è individuata con riferimento ai punti cardinali e alle direzioni intermedie ottenendo 8 diverse categorie; in alcuni casi si considerano anche le ulteriori direzioni intermedie ottenendo 16 diverse categorie.

Si è anche soliti riferirsi ad una velocità media del vento indipendentemente dalla direzione.

La velocità del vento, in termini di modulo e di direzione, è molto variabile nel tempo. Per descrivere il vento in un dato luogo, pertanto, è utile riferirsi a valori mediati in opportuni intervalli di tempo.

Una modalità valida per la rappresentazione della direzione e della velocità del vento, è l'impiego di diagrammi in cui si riporta la distribuzione percentuale della direzione del vento. Tali diagrammi, costituiti da settori circolari orientati il cui raggio è proporzionale all'incidenza percentuale con cui si riscontra una data direzione del vento, sono tracciati su di una rosa dei venti nella quale il nord è indicato verso l'alto. Ciascun settore circolare è diviso in porzioni, le quali rappresentano le diverse classi di velocità, di larghezza proporzionale alla percentuale di incidenza delle diverse classi di velocità del vento che soffiano in quella particolare direzione. La dimensione del cerchio centrale rappresenta la percentuale di calma di vento (**Figura 3**).

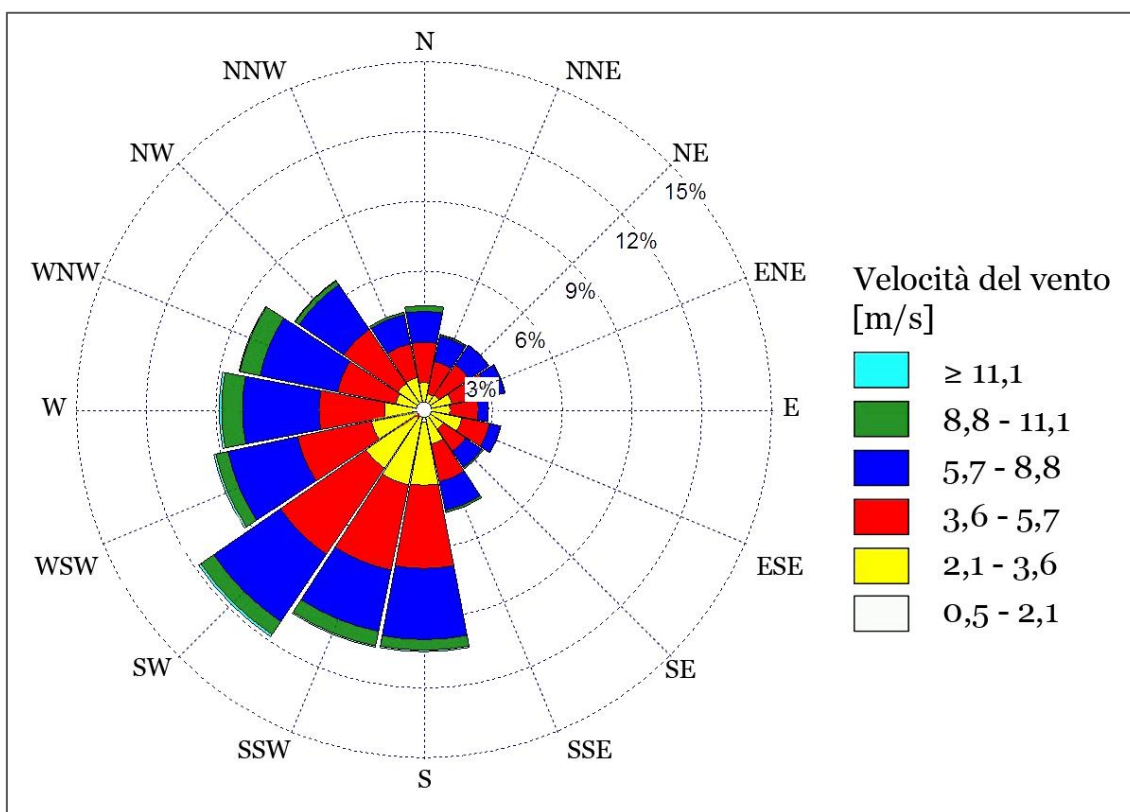


Figura 3 - Diagramma di frequenza, velocità e direzione del vento.

Condizioni del cielo

La copertura nuvolosa di un dato sito ha sensibili ricadute sulla quantità e sulla qualità della radiazione solare incidente. Tale grandezza esprime la presenza media di elementi di copertura del cielo (nuvole); si valuta in *okta*, considerando sereno un cielo con 0 *okta*, completamente nuvoloso quando la copertura del cielo vale 8 *okta*.

In mancanza di tale dato, la presenza di nubi è deducibile dall'*indice di soleggiamento relativo*, anche detto *eliofania relativa*, dato dal rapporto tra ore di cielo sereno e lunghezza del giorno. Le ore di cielo sereno sono indicate dall'intervallo di tempo nell'arco della giornata in cui la radiazione solare raggiunge un certo valore (di solito 200 W/m^2) tale da essere registrata da un apposito strumento detto eliofanometro.

Il ricorso all'indice di soleggiamento relativo introduce in ogni caso l'approssimazione che la nuvolosità sia uniformemente distribuita in tutta la

giornata e addirittura durante tutto il mese, poiché questo indice viene in genere fornito come valore medio mensile.

Nubi alte e stratificate come *cirri* e *cirrostrati* tendono a riscaldare l'atmosfera lasciando passare la radiazione solare e bloccando la radiazione terrestre uscente ad onda lunga; viceversa le nubi basse, dense e spesse tendono a raffreddare la superficie terrestre riflettendo direttamente la radiazione solare entrante.

Precipitazioni

L'entità delle precipitazioni costituisce insieme a temperatura dell'aria e intensità della radiazione solare una delle grandezze fondamentali per la meteorologia.

Andamento delle precipitazioni meteoriche, desunto ponderando la frequenza delle precipitazioni nelle diverse forme (pioggia, neve, grandine), misurata contando i giorni durante i quali esse si verificano, e la portata, espressa in millimetri d'acqua per unità di tempo (ora, giorno, anno).

Fattori meso e micro-climatici

Come anticipato in precedenza, nella realtà dei fatti non esistono condizioni climatiche uniformemente distribuite in una ampia zona, in quanto il clima risulta fortemente condizionato dalle peculiarità ambientali dei luoghi le quali si avvicinano secondo intervalli spaziali spesso limitati.

Gli elementi che determinano il microclima di un sito sono la radiazione solare e la sua esposizione al vento. Sono stati illustrati, infatti, i fenomeni per i quali la radiazione solare e la ventilazione determinino rispettivamente aumenti e diminuzioni di temperatura dell'aria. Questi due fattori climatici combinandosi con fattori geografici locali (altitudine, topografia, presenza di masse d'acqua, tipo di copertura del suolo) contribuiscono a originare lo specifico microclima di un luogo.

È già stato descritto come la temperatura dell'aria diminuisca con l'altitudine, in condizioni normali di 0,65 °C ogni 100 m. Salendo di quota lungo il versante di

un rilievo, dunque, si rileveranno condizioni climatiche più rigide, in termini di temperatura.

Tale grandezza, inoltre, varia notevolmente con l'esposizione. I versanti inclinati rispetto alla radiazione solare durante l'inverno e le stagioni intermedie ricevono una intensità di radiazione maggiore rispetto al piano.

I versanti delle valli esposti a sud-ovest sono generalmente più caldi perché la radiazione li colpisce nelle ore del giorno in cui la temperatura è più alta.

La zona intermedia delle valli, invece, in inverno è più calda sia rispetto al fondovalle, soggetto a limitata insolazione, sia rispetto alle creste esposte all'azione dei venti.

Nelle zone ad orografia complessa i venti vengono rafforzati, indeboliti o deviati.

In corrispondenza di un ostacolo si ha una zona riparata, in "ombra di vento", i flussi che aggirano l'ostacolo aumentano invece la loro velocità. Il vento è deviato da una collina sia in senso verticale che orizzontale. Si hanno velocità più elevate in corrispondenza della cima e del versante sottovento e condizioni di relativa calma di vento sul versante non esposto (**Figura 4**).

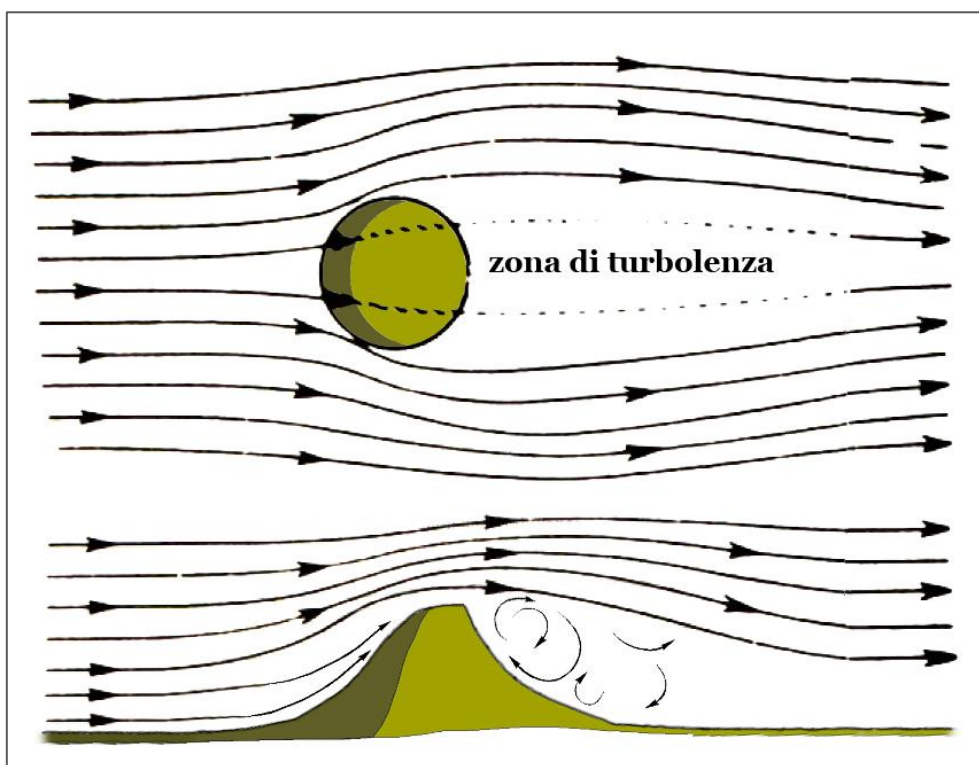


Figura 4 - Schematizzazione del comportamento di un flusso di vento che spira sul versante di una collina.

Altro fenomeno che è capace di influenzare sensibilmente la temperatura di un determinato luogo è la presenza di brezze di valle, di monte, di terra o di mare.

Ad esempio, durante le ore del giorno la radiazione solare che colpisce le cime e le parti più alte di una valle, riscalda l'aria che tende a salire richiamando altra aria dal fondovalle e generando un flusso d'aria detto brezza di valle.

Nelle ore notturne, invece, le parti più alte e più esposte reirradiano il calore accumulato durante il giorno verso il cielo.

Tali versanti, raffreddandosi e raffreddando l'aria che, aumentata di densità tende a scendere verso valle generando la cosiddetta brezza di monte.

L'acqua ha un calore specifico più elevato del terreno, è necessaria cioè una quantità di calore maggiore per innalzare (o diminuire) la temperatura di una unità di massa di acqua di 1 °C. Le masse d'acqua tendono, quindi, a rimanere più calde della terraferma in inverno e più fredde in estate. Giornalmente, inoltre, esse tendono a rimanere più calde del terreno durante la notte e più fredde durante il giorno. A causa di questa differenza di temperatura le masse d'aria che stazionano in corrispondenza del mare e della terraferma presentano temperature differenti. Ciò determina la creazione di gradienti di pressione che generano venti locali e periodici detti brezze. La brezza di terra che spira dalla costa verso il mare, mentre la brezza di mare in direzione opposta.

Altro fattore di rilevante importanza nella modifica della temperatura di un sito è la vegetazione. La presenza di una copertura vegetale, infatti, limita l'insolazione sul terreno e quindi le escursioni di temperatura. Una parte di energia viene riflessa e una parte assorbita dalle piante e utilizzata per il processo di fotosintesi. Inoltre, i fenomeni di evapotraspirazione coinvolti nel metabolismo delle piante determinano valori di umidità relativa dell'aria tendenzialmente elevati, di solito superiori del 5-10% rispetto a quelli riscontrabili in luoghi con scarsa copertura vegetale. L'evapotraspirazione è, infine, responsabile di fenomeni di raffrescamento durante il periodo estivo.

Anche gli insediamenti urbani generano effetti profondamente significativi sul clima locale per ragioni che saranno oggetto di ampia trattazione nei paragrafi successivi.

Clima e insediamenti urbani

La combinazione dei fattori climatici influenza le condizioni atmosferiche di ogni luogo in modo diverso, per cui ogni punto della Terra ha un suo clima locale caratteristico, diverso da quello di ogni altra parte del mondo.

Il clima di una specifica area geografica, inoltre, condiziona in maniera determinante non solo lo sviluppo della flora e della fauna, ma anche i comportamenti e gli stili di vita delle popolazioni e la maniera in cui esse conducono i processi di antropizzazione del territorio.

Sono quattro gli elementi climatici che hanno da sempre influenzato i criteri adottati dall'uomo per realizzare gli insediamenti urbani: temperatura, umidità, radiazione solare e vento. In base alla localizzazione di un insediamento, ogni elemento può rappresentare una risorsa o un impedimento per il comfort di chi vive quel determinato spazio.

Tali impedimenti si manifestano quando i suddetti elementi rendono meno tollerabile per gli utenti della città le condizioni climatiche stagionali.

La temperatura costituisce un elemento da contrastare quando è frequentemente troppo calda o troppo fredda; il vento quando tende ad abbassare temperature già fredde o quando, in climi caldi e secchi, causa ulteriore riscaldamento e disidratazione; l'umidità quando è tanto alta da impedire il raffrescamento evaporativo, la radiazione solare quando contribuisce a surriscaldare l'ambiente.

Gli stessi elementi diventano una risorsa per il clima quando alleviano le condizioni stagionali estreme.

La temperatura rappresenta un elemento favorevole quando le escursioni (dal giorno alla notte) sono abbastanza ampie da massimizzare i benefici dell'inerzia termica delle costruzioni. Analogamente il vento rappresenta una risorsa, in climi caldi e umidi, quando consente di disperdere l'umidità. Quest'ultima, nei climi caldi, è un fattore positivo, in quanto ad un aumento di vapore acqueo nell'aria corrisponde una diminuzione della temperatura. Nei climi freddi, invece, l'incremento di temperatura può essere garantito solo da un aumento della radiazione solare.

Le differenze tra località di una medesima regione climatica sono spesso modeste. Tali differenze, tuttavia, al variare della regione climatica sono di entità tale da condizionare la forma e l'aspetto degli insediamenti urbani.

Dal punto di vista edilizio, il manufatto "climaticamente responsabile" è da sempre presente nella storia dell'uomo, come dimostrano sia l'architettura tradizionale delle regioni caratterizzate da climi estremi, sia elementi formali e tecnici consolidati nel patrimonio tradizionale di ogni luogo (Sasso, 2001).

L'integrazione tra fattori climatici ed insediamenti urbani non è, infatti, frutto solamente di moderni studi tecnici e non riguarda progettazioni elaborate soltanto a partire dal XX secolo. Se si ripercorrono le fasi salienti della storia dell'urbanistica, si può affermare pacificamente come già le prime civiltà ponessero attenzione all'adattamento dell'ambiente costruito al clima e alle condizioni ambientali in generale. I primi insediamenti urbani, infatti, non avevano alternative se non quella di adattarsi al clima del territorio su cui sorgevano.

Le indicazioni dei trattatisti e dei filosofi dell'antica Grecia, in merito alla scelta del luogo ove fondare una città erano improntate alla ricerca di un ambiente fisicamente perfetto, fonte, di per sé, di benessere psicologico e spirituale. In questo senso Aristotele, nel IV secolo a.C., indica per l'ubicazione della città declivi bene esposti a Levante o a Mezzogiorno, così come Oribasio di Pergamo (città a Sud, bene esposte al sole e ai venti), e ancora Ippocrate consiglia localizzazioni su terreno in pendio con l'esposizione di Levante (Cremonini, 2005).

Nel I sec. a.C., Vitruvio, dedica l'inizio del Liber VI del *De Architectura* alla trattazione dell'influenza del clima sull'architettura. Secondo Vitruvio, nelle regioni settentrionali, le case dovrebbero essere ben chiuse e protette dai venti freddi, ma aperte a Sud, ossia verso il sole, per riuscire a ricevere, in inverno, il massimo degli apporti solari. Nelle calde regioni del Meridione, invece, le case devono invece proteggere dal caldo e offrire freschezza in estate. Per questo motivo devono aprirsi verso nord o verso nordest. In tutte le altre regioni questi due principi si dovrebbero applicare secondo le esigenze e le condizioni climatiche locali.

Tralasciando la produzione letteraria dei trattatisti, se si considerano le tecniche edilizie tradizionali, risulta evidente come, fin dai tempi più remoti, ciascuna fascia climatica abbia sviluppato tipologie costruttive che permettessero il miglior comfort interno possibile, a partire dalle condizioni esterne. Limitandosi

nella considerazione proposta alla sola penisola italiana, si assiste a una divisione in due strategie fondamentali adottate per far fronte alle due condizioni climatiche predominanti: il clima mediterraneo, caratterizzato da inverni miti e piovosi ed estati calde e secche, e quello alpino, decisamente più rigido nella lunga stagione fredda e fresco e piovoso in estate.

Nel primo caso, le strategie di integrazione dell'ambiente costruito con le caratteristiche del clima mediterraneo contemplavano: l'uso di grandi masse murarie allo scopo di fornire un'elevata inerzia termica che ritardasse l'ingresso del calore; l'adozione di colori chiari per i paramenti esterni così da minimizzare i guadagni solari; lo sfruttamento degli elementi di ombreggiamento quali tende o vegetazione distribuite all'interno del tessuto urbano; la realizzazione di fontane in prossimità degli abitati per giovare del raffrescamento evaporativo. Un celebre esempio applicativo di quanto enunciato è rappresentato dai Trulli, costruzioni tipiche della Puglia centro-meridionale.

In condizioni di clima alpino, invece, l'architettura vernacolare al fine di mantenere il calore all'interno degli edifici seguiva principi quali: la limitazione del rapporto tra superficie e volume dell'edificio per ridurre le perdite di energia termica per trasmissione; la predisposizione di ampie facciate esposte a sud e limitate nelle altre direzioni grazie al parziale interramento nel terreno in dislivello, allo scopo di proteggere l'abitazione dai venti freddi provenienti da settentrione; la limitazione delle aperture quali porte e finestre, che hanno sempre sviluppo minimo al fine di limitare le dispersioni; la presenza di locali tampone (come fienili o stalle) o di elementi addossati alle pareti (depositi di legna da ardere) per aumentarne la resistenza termica; la compattezza degli insediamenti al fine di realizzare un fronte unico contro l'attacco delle correnti d'aria fredda e delle nevi.

L'abitudine a costruire assecondando le caratteristiche climatiche del luogo viene lentamente superata quando, con un processo avviatosi dalla rivoluzione industriale, cominciano ad essere disponibili risorse energetiche senza un apparente limite di quantità e a basso costo e cominciano ad essere progettati e prodotti i primi sistemi di riscaldamento e climatizzazione degli ambienti. L'architettura e, di riflesso, l'urbanistica tendono verso un modello che riconosce la sua forza energetica nella sola componente impiantistica, e svincola

completamente la progettazione dalle caratteristiche del clima del luogo in cui sorge un insediamento.

Tale processo viene ulteriormente accelerato quando, al termine della Prima Guerra Mondiale, nasce il Movimento Moderno, caratterizzato dal tentativo di sviluppare morfologie urbane, tipologie edilizie e tecnologie costruttive con caratteri internazionali, cioè indifferenti ai contesti e alle risorse localmente disponibili. Uno degli esiti meno felici di tale processo è stato la diffusione di modelli che si sono rivelati largamente insostenibili nell'attuale contesto delineato dalla crisi ambientale (Scudo, 2009). Al lento smarrimento delle tecniche costruttive tradizionali, si è affiancato, quantomeno negli ambiti più urbanizzati, un appiattimento delle forme edilizie ed urbane svincolate dalla necessità di distinguersi per motivi climatici.

Ciononostante, con il XX secolo si dà inizio ad una importante produzione scientifica da parte di studiosi europei ed americani volta ad approfondire le relazioni tra il clima e i criteri di progettazione urbana ed edilizia.

In Italia, l'ingegner Antonio Pedrini pubblica nel 1905 *La città moderna*, un tentativo audace di far confluire in un'unica entità disciplinare - la tecnica urbanistica - studi, argomenti, sino ad allora affrontati separatamente. In tale corposa opera è affrontata, seppur con una accentuata impostazione igienista tipica del tempo, una vasta gamma di argomenti riguardanti principi e norme fondamentali per la costruzione della città moderna. La quarta parte del volume è prevalentemente incentrata sugli edifici pubblici e privati, con riferimento ad esposizione orientamento, tipologie edilizie. Il Pedrini riconosce come la latitudine e l'esposizione abbiano una forte influenza sulla sistemazione edilizia e stradale dei gruppi di abitazioni di un dato paese. In particolare, alla latitudine è riconosciuta la capacità di influenzare il rapporto che intercorre tra "i gruppi delle abitazioni e le reti stradali" dal momento che "nei paesi freddi, del nord, nei quali si cercano il sole, la luce, è evidente che dobbiamo trovare maggiore larghezza stradale. Non è così da dirsi per i paesi caldi, del mezzogiorno, nei quali una strada stretta difende gli abitanti delle case che la con terminano dai due nemici: il sole e la polvere" (Pedrini, 1905). Egli, per paesi dal clima caldo, giunge a fissare un rapporto tra altezza delle case e larghezza stradale compreso tra 1 e 2, capace di conciliare i benefici dell'ombreggiamento e l'inconveniente di una aerazione meno agevole.

Ugualmente rilevante, secondo l'autore, è l'orientamento delle strade in quanto esso condiziona "l'azione del sole e l'influenza dei venti". Pedrini riconosce all'orientamento Nord-Sud il primato su quello Est-Ovest in quanto esso permette "una più regolare distribuzione di luce e di calore nella strada, nel suo complesso di suolo stradale e di prospetti di case". Per quanto riguarda la ventilazione, tuttavia, tale primato si inverte in quanto le strade con orientamento Nord-Sud "soffrono i venti più freddi del nord".

A considerazioni analoghe è sottoposta l'analisi della disposizione di gruppi di abitazione. La distribuzione lungo una rete ortogonale stradale è definita la migliore, in quanto "qualunque dei venti cardinali spiri" vi è sempre un richiamo d'aria in tutta la rete stradale, ma le case non dovrebbero essere allineate lungo i cigli stradali ma "in ritiro, per la larghezza dei marciapiedi, ombreggiati questi da piante".

Nel 1928 l'architetto francese Adolphe Augustin Rey pubblica uno studio condotto con gli svizzeri Charles Barde, architetto, e Justin Pidoux, astronomo, da cui emerge che maggior luce solare è captata da un'esposizione a sud, ma un'esposizione a sud-est garantisce il più alto apporto di calore. Ciò è alla base del concetto di *asse eliotermico* che diventa la base per una pianificazione della città attenta agli aspetti della radiazione solare. Per la latitudine di Parigi, tale asse era stimato essere inclinato di 19° verso est, e le facciate degli edifici sarebbero dovute essere allineate lungo strade parallele a tale direzione (Rey et al., 1928).

Venti anni dopo, Gaetano Vinaccia ha criticato l'asse eliotermico, proponendo invece l'*asse equisolare* orientato all'incirca nord est-sud ovest (formante con l'asse est-ovest un angolo variabile a seconda della latitudine); la proposta di Vinaccia nasceva dalla preoccupazione di perequare l'effetto termico per quattro esposizioni anziché per due sole, ipotizzando tipologie edilizie a quattro orientamenti anziché due (Vinaccia, 1940) (Figura 5).

Da segnalare anche il lavoro di Jeffrey Ellis Aronin, architetto inglese, che nel 1953 pubblica "Climate and Architecture" in cui l'autore, oltre a fornire una dettagliata bibliografia riguardante i testi che hanno affrontato il tema del rapporto tra clima e architettura, dedica ampio spazio agli accorgimenti da assumere per pianificare gli insediamenti urbani in relazione al sole, al vento e alle precipitazioni meteoriche.

Negli anni '50 negli Stati Uniti si diffonde il concetto di *architettura bioclimatica* a seguito delle ricerche dei fratelli Olgyay, presso l'Università di Princeton. Nel 1962 Victor Olgyay pubblica un manuale di importanza strategica per la progettazione ambientale e per la definizione di comfort climatico, "Design with the Climate, Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism", che costituisce il manifesto dell'architettura bioclimatica.

Il lavoro pionieristico dei fratelli Olgyay evidenziò il ruolo dei problemi climatici in un contesto più sistematico e scientifico (Tombazis, 2001).

Con la prima crisi petrolifera, nei primi anni '70, iniziano a farsi avanti i primi tentativi di progettazione in funzione del clima, con particolare attenzione allo sfruttamento delle fonti naturali di energia. Il risultato di ciò fu uno sforzo concentrato per ridurre il riscaldamento degli edifici con una predominanza iniziale di sistemi attivi – impiego di tecnologie quali collettori solari e pannelli captanti – cui ha fatto seguito, a partire dalla seconda metà degli anni '70, l'approccio passivo basato su sistemi di captazione delle radiazioni solari – superfici captanti e serre, controllo e gestione dei moti convettivi dell'aria, muri di Trombe – integrati a componenti in grado di conservare l'energia – masse di accumulo, coibentazione termica maggiorata (Sasso, 2001).

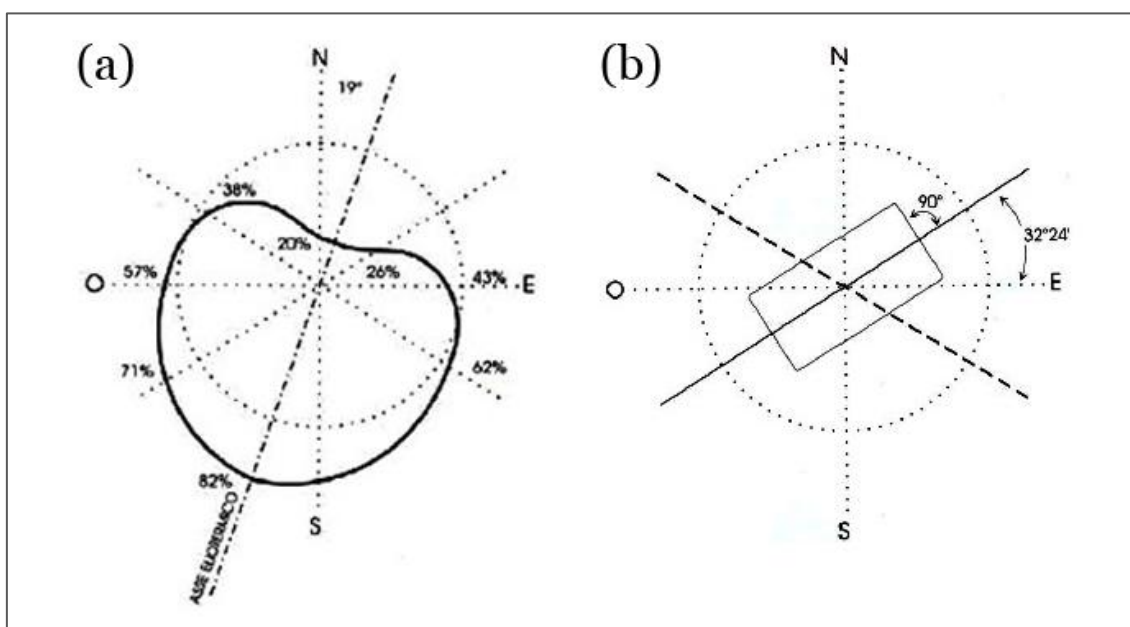


Figura 5 - Schematizzazione dell'asse eliotermico proposto da Rey (a), e dell'asse equisolare proposto da Vinaccia (b).

Oggi, le esigenze di riduzione dei consumi energetici e delle emissioni legate alle attività antropiche, per i motivi legati al *climate change* che saranno analizzati nei capitoli successivi, portano a declinare il tema della progettazione e pianificazione sostenibile in termini di *low technologies* e spingono la comunità scientifica verso la ricerca di soluzioni a basso costo e di scarso impatto ambientale. D'altra parte, è stato proprio l'approccio all'architettura bioclimatica a riaccendere l'interesse per quelle architetture che hanno saputo mettere a punto una cultura architettonica capace di riconoscere l'importanza degli equilibri naturali, distorti dal mondo industrializzato, dominato da un'incondizionata fiducia nel progresso tecnologico (Montini Zimolo, 2008).

CAPITOLO 2 - Il Cambiamento Climatico

Alcuni numeri sul *climate change*

I cambiamenti climatici sono stati in questi anni al centro dell'attenzione scientifica e mediatica per il crescente impatto di fenomeni meteorologici estremi in diverse aree del globo, e per l'evidenza empirica dei danni economici, sociali e ambientali provocati dal riscaldamento globale che potranno incrementarsi in futuro (IPCC, EEA, *Stern Review*).

È ormai, infatti, largamente riconosciuto dalla comunità scientifica internazionale, e suffragato dai rapporti dell'*International Panel for Climate Change* (IPCC), che ai ciclici mutamenti naturali dei sistemi ambientali da sempre rilevati si sia andato a sovrapporre il contributo decisivo dell'attività antropica, in termini sia di incremento delle emissioni clima-alternati che in termini di mancata e soprattutto inefficace programmazione territoriale. Le attività umane sono state individuate quali principali responsabili dell'incremento di temperatura registrato, dello sconvolgimento del regime delle precipitazioni e dell'innalzamento del livello dei mari, nonché dell'aumento della frequenza e dell'intensità di eventi estremi, che accrescono una pluralità di rischi a livello locale, per i territori e le città (Musco, Magni, 2014).

L'IPCC – agenzia delle Nazioni Unite, che si occupa di valutare e riassumere il lavoro degli scienziati di tutto il mondo che studiano i temi del *climate change* – nel corso degli ultimi 20 anni, ha fornito valutazioni con un sempre minore grado di incertezza e, nel suo *Fifth Assessment Report*, ha stimato con probabilità pari al 95%, che il cambiamento climatico sia da ricondurre principalmente all'emissione di gas serra (IPCC, 2013).

Tale documento, la cui versione finale è stata pubblicata nel novembre 2014, restituisce un quadro impietoso dell'andamento della temperatura media del pianeta. Ognuna delle ultime tre decadi è stata più calda dei ogni altro decennio precedente, dal 1850, e i primi dieci anni del XXI secolo sono stati i più caldi in assoluto. In particolare, nel periodo che va dal 1901 al 2012, la temperatura

media globale⁴ è aumentata di 0,89 °C. Quasi la metà di tale incremento di temperatura (0,4 °C) è stato maturato tra il 1979 e il 2005 (Climate Central, 2013).

Cause del *climate change* e responsabilità degli insediamenti urbani

Il meccanismo con cui l'atmosfera intrappola in calore, chiamato "effetto serra", è generato dalla presenza nell'atmosfera terrestre delle molecole di alcuni gas che impediscono alla radiazione infrarossa emessa dalla Terra, riscaldata a sua volta dalla radiazione solare, di 'sfuggire' direttamente nello spazio. Uno di questi gas, definiti appunto *gas serra* o *greenhouse gases* (GHG), è l'anidride carbonica (CO₂). Quando una molecola di CO₂ è colpita da radiazione infrarossa assorbe energia che, in seguito, in parte riemette. Il calore emesso dalla Terra e catturato dalle molecole di CO₂ non si disperde subito nello spazio ma prima riscalda l'aria e, dunque, la Terra.

La CO₂ non è né l'unico né il più comune dei gas serra. Il vapore acqueo, ad esempio, terzo elemento in ordine abbondanza presente in atmosfera, e cento volte più presente della CO₂ in un volume di atmosfera, contribuisce ad acuire il riscaldamento prodotto dall'anidride carbonica. Esso, tuttavia, proviene quasi interamente dall'evaporazione delle masse d'acqua presenti nel globo e dall'umidità presente nei suoli e, pertanto, la sua concentrazione atmosferica non è direttamente controllabile dall'uomo il quale può solamente intervenire indirettamente controllando, la temperatura e limitandone l'evaporazione.

Il terzo gas serra più comune è il metano (CH₄), originato sia da processi naturali (decomposizione batterica della materia vegetale) che antropici (fermentazione dei rifiuti, risaie, pastorizia, etc.). Il quarto è il protossido di azoto (N₂O), anch'esso generato da fonti naturali (batteri) e artificiali (fertilizzanti agricoli, gas di scarico di autovetture, industria chimica, etc.). Sono gas serra anche molti altri composti chimici di uso industriale, spesso a base di cloro e di fluoro.

⁴ Per temperatura media globale si intende la temperatura media delle terre emerse e degli oceani.

È bene ricordare che, sebbene tali composti, in molti casi, intrappolino il calore con molta più efficienza di quanto non sia capace di fare l'anidride carbonica, la bassa concentrazione in atmosfera degli stessi o la loro rapida tendenza a scindersi in altri composti rende la CO₂ il gas serra di gran lunga più temibile. Bisogna, inoltre, tener presente che la maggior parte di questi gas esiste già in natura e essi in passato hanno riscaldato il pianeta rendendolo abitabile. Tuttavia, l'aumento incontrollato della concentrazione degli stessi in atmosfera può alterare l'equilibrio energetico della Terra (Climate Central, 2013).

L'IPCC ha confermato che la concentrazione di anidride carbonica in atmosfera, dovuta all'attività umana (principalmente riconducibile alla deforestazione e all'utilizzo di combustibili fossili per la produzione di energia), è aumentata più del 20% dal 1958 e di circa il 40% dal 1750.

I risultati del *Berkeley Earth Surface Temperature project* (BEST) hanno, inoltre, mostrato come il trend della temperatura media annuale nel breve periodo (1753-2012), pari a circa 1,5 °C, sia riconducibile alle emissioni umane di gas serra combinate con l'attività vulcanica⁵. Tale aumento, graduale, ma sistematico, è spiegato dalle misurazioni della concentrazione di CO₂, rilevata da campioni atmosferici e dall'aria intrappolata nei ghiacci polari. Sebbene la correlazione dei dati non provi scientificamente il rapporto causale tra aumento di concentrazione di CO₂ e riscaldamento globale, non esiste nessuna altra possibile causa avente una correlazione altrettanto forte (Muller, 2012).

Nel complesso, il 20% delle attuali emissioni umane di gas-serra proviene dalla combustione del carbone, percentuale che sale al 40% se si considerano soltanto le emissioni legate alla produzione di energia.

Inoltre, il 25% della CO₂ oggi presente in atmosfera è stato prodotto bruciando combustibili fossili o distruggendo organismi vegetali, principalmente attraverso l'attività di deforestazione nelle regioni equatoriali.

Le città sono la causa principale dell'emissione di gas serra. La metà della popolazione mondiale vive in città e molte stime ipotizzano che tale percentuale sia destinata a raggiungere una cifra compresa tra il 60% e il 70% nel 2050. Le

⁵ Grandi eruzioni vulcaniche diffondono nell'atmosfera enormi quantità di polvere e di gas, fra cui particelle dette "aerosol di solfati", che formano nella stratosfera una 'nebbia' capace di riflettere buona parte della luce solare, provocando un raffreddamento della superficie terrestre per alcuni anni (Climate Central, 2013; Carraro, Mazzai, 2015).

città consumano circa l'80% della produzione di energia a livello mondiale e determinano una percentuale simile sul totale delle emissioni di gas serra. Al crescere dello sviluppo economico di una nazione le emissioni di gas climalteranti sono causate in misura minore dalle attività industriali e in maniera maggiore dalla produzione di energia per soddisfare i servizi necessari al funzionamento delle città quali l'illuminazione, riscaldamento e condizionamento degli edifici (WB, 2010).

L'impatto di una città sul cambiamento climatico, dunque, è proporzionale al livello di energia prodotta e dalla combinazione di fonti energetiche utilizzate per soddisfare il proprio fabbisogno. Le città più ricche, con minore densità e/o che dipendono prevalentemente dal carbone per produrre energia, risulteranno responsabili di una maggiore emissione di GHG.

Pertanto, le modalità con cui la città cresce, si sviluppa e richiede energia risultano essere un fattore determinante su cui agire per invertire le tendenze attuali.

Principali effetti attesi e rischi per le città

Poiché i modelli climatici in uso non sono ancora in grado di fornirne una rappresentazione esatta, gli scienziati sanno che non è possibile prevedere il clima futuro con assoluta accuratezza. Per tale motivo, le previsioni per il riscaldamento del pianeta, l'innalzamento dei mari e altri fenomeni non sono dati come valori, bensì come intervalli di valori probabili.

Ciò che è certo è che l'entità del cambiamento climatico dipenderà dalle azioni che il genere umano compirà in futuro. In altre parole, la quantità di cambiamenti climatici che possiamo aspettarci dipenderà da quanti gas serra noi umani emetteremo in futuro (Climate Central, 2013).

Come risulta dal *Fourth Assessment Report* dell'IPCC, allo scenario basato sul livello minimo di emissioni corrisponde un aumento di temperatura di 1,7 °C, mentre allo scenario basato sul livello massimo, un riscaldamento di 4 °C (IPCC, 2007).

Analogamente, il *Fifth Assessment Report* mette in guardia sul fatto che gli impatti saranno per lo più negativi ed essi si aggraveranno se non si agisce in maniera significativa per ridurre le emissioni di gas serra (IPCC, 2014).

Nel corso della Conferenza di Parigi sui cambiamenti climatici, (COP21) tenutasi dal 30 novembre al 12 dicembre del 2015, i rappresentanti di 196 Paesi hanno concordato di ridurre la loro produzione di ossido di carbonio “il più presto possibile”, di fare del loro meglio per mantenere il riscaldamento globale “ben al di sotto di 2° C” in più rispetto ai livelli pre-industriali e di “proseguire negli sforzi per limitare l’aumento della temperatura a 1,5°”. L’accordo non diventerà vincolante per gli Stati membri fino a quando almeno 55 Paesi che producono oltre il 55% dei gas serra non avranno ratificato l’accordo. Ogni Paese che ratifica l’accordo sarà tenuto a fissare un obiettivo di riduzione delle emissioni, ma il quantitativo sarà volontario.

Gli impegni presi dall’Unione europea a Parigi, e in particolare la spinta verso l’obiettivo degli 1,5 °C, richiedono un cambio di rotta rispetto al modestissimo accordo sul Pacchetto Energia 2030, che prevede obiettivi di riduzione delle emissioni del 40% (invece del 55%) rispetto al 1990 e di promozione di efficienza energetica e rinnovabili neppure sufficienti (27% non vincolanti a livello nazionale) ad assicurare il rispetto della limite dei 2 °C.

Le stime effettuate con i modelli attualmente disponibili e con riferimento alle emissioni attuali di gas serra disegnano un quadro preoccupante. Entro il 2100 il livello del mare potrebbe alzarsi di una quota compresa tra 60 centimetri e 1,8 metri ed è previsto un incremento della frequenza e dell’intensità degli uragani più distruttivi. Inoltre, se il livello del mare continuerà a salire, le onde anomale, partendo appunto da un livello più alto, diventeranno più distruttive.

In alcune parti del mondo, come, ad esempio, alcune nazioni bagnate dall’Oceano Indiano, l’innalzamento del mare potrebbe costringere milioni di persone ad abbandonare i luoghi d’origine o causare l’inabitabilità di molte terre emerse. Una temperatura più alta oltre a determinare un incremento delle ondate di calore, accelererà il ciclo dell’acqua e ciò determinerà più alluvioni e più siccità, con ripercussioni evidenti sulla produzione agricola mondiale e con impatto indubbiamente maggiore nei luoghi dove l’acqua già ora scarseggia (Climate Central, 2013).

Secondo la rivista “The Lancet”, una delle più autorevoli in campo medico, il *climate change* potrebbe diventare la più grande minaccia del XXI secolo per la salute dell’umanità (Costello et. al, 2009). I rischi per la salute dovuti al cambiamento climatico sono numerosi e sono principalmente dovuti all’aumento dell’intensità di estremi climatici – in particolar modo, le ondate di calore, che contribuiscono al peggioramento di malattie cardiovascolari e respiratorie, soprattutto tra gli anziani – e ad eventi meteorologici di eccezionale entità, agli effetti sull’approvvigionamento di acqua e cibo e alla trasmissione di malattie (Carraro, Mazzai, 2015).

L’Europa non è al riparo da tali impatti. Basta ricordare l’eccezionale numero di decessi, circa 70.000, causato nel vecchio continente dalle ondate di calore del 2003.

I punti più vulnerabili dello scenario di rischio descritto sono rappresentati proprio dalle città, soprattutto in ragione del sopracitato esasperato processo di urbanizzazione in atto. Centinaia di milioni di persone nelle aree urbane di tutto il mondo saranno colpite dall’innalzamento del livello del mare, dall’aumento delle precipitazioni, dalle esondazioni dei fiumi, da più frequenti e forti cicloni, e periodi di caldo e freddo estremo.

In realtà, molte grandi città costiere con una popolazione di oltre 10 milioni di abitanti sono già in pericolo. Il *climate change* può anche avere un impatto disastroso sulle infrastrutture, peggiorare l’accesso ai servizi urbani di base e, di conseguenza, la qualità della vita nelle città. Inoltre, la maggior parte delle infrastrutture economiche e sociali, le sedi di governo, e beni immobili si trovano nelle città.

Nonostante tali rischi, molte città non hanno ancora affrontato le questioni legate al cambiamento climatico. Le ragioni principali sono da ricondurre a: mancanza di politiche cittadine e piani d’azione; obsolescenza degli strumenti di pianificazione urbanistica e territoriale rispetto ai temi del *climate change*; mancanza di consapevolezza pubblica sulla variabilità del clima e sulla mitigazione dei rischi indotti dai cambiamenti climatici. Tuttavia, se correttamente pianificate e gestite attraverso adeguate strutture di *governance*, le città possono essere luoghi di innovazione ed efficienza e diventare il

laboratorio in cui definire e mettere in essere le strategie di contrasto al *climate change* che saranno analizzate nel capitolo successivo.

CAPITOLO 3 - Strategie di contrasto al *climate change*

Mitigazione e adattamento

Per contrastare il *climate change*, la Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UN, 1992) individuava due strategie: la mitigazione delle sue cause antropiche e l'adattamento a suoi effetti ambientali.

L'IPCC definisce la mitigazione come un intervento antropico teso a ridurre le fonti di produzione dei gas serra o incrementarne le fonti di assorbimento. L'adattamento è invece descritto come la regolazione di sistemi naturali o umani, in risposta a stimoli climatici attuali e/o previsti o ai loro effetti, orientato a limitare i danni o a sfruttare i benefici ad essi connessi (IPCC, 2001). Appare chiaro come le strategie di mitigazione intervengano sulle cause del cambiamento climatico e tendano a ridurre tutti gli effetti; al contrario, l'adattamento cerca di affrontare le conseguenze del fenomeno, sfruttando effetti positivi e riducendo quelli negativi.

Come accennato in precedenza, la possibilità di limitare il riscaldamento globale al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali risulterà essere tanto meno fattibile quanto più si ritarderà nell'adozione di misure per contenere le emissioni di gas climalteranti.

Ciò impone con urgenza il disegno di una politica del clima progettata in modo ottimale che contempli un piano dettagliato, credibile, per la mitigazione delle emissioni di gas serra, comprendente obiettivi di decarbonizzazione dell'economia e di aumento dell'efficienza energetica (Carraro, Mazzai, 2015) (Figura 6).

Le principali strategie di mitigazione da adottare in ambito urbano riguardano azioni tese al cambiamento dei comportamenti di viaggio della popolazione e/o all'efficientamento degli impianti di condizionamento al fine di ridurre le emissioni di gas serra.

Accanto alle misure di mitigazione anche la politica di adattamento rappresenta un elemento cardine per il controllo dei cambiamenti climatici, soprattutto per affrontare e attenuare gli inevitabili effetti avversi del *climate change*, in

particolare nel breve periodo, fino a quando le azioni di mitigazione non produrranno i primi effetti benefici (Stern, 2007).

Gli impatti del *climate change* non sono affatto lontani. Certamente non si sono ancora sperimentati i suoi effetti peggiori ma, come in precedenza ricordato, è già in corso l'alterazione delle temperature globali e delle precipitazioni, lo scioglimento dei ghiacci artici e il conseguente innalzamento del livello del mare. Fenomeni, questi, che, a loro volta, influenzano l'intensità, la frequenza e la prevedibilità degli eventi estremi, comportando un significativo aumento dei rischi ad essi associati.

Se la mitigazione è, dunque, indispensabile per contenere l'aumento della temperatura del pianeta e gli impatti ad esso connessi, l'adattamento è ugualmente necessario dal momento che una parte dei cambiamenti climatici è per il momento inevitabile e i relativi effetti sono già in atto.

La riduzione della vulnerabilità dei territori e l'aumento della *resilienza*, ovvero della capacità adattativa degli stessi agli impatti previsti, è la strada che gli organi di governo, a tutti i livelli istituzionali, dovrebbero percorrere (Figura 7).

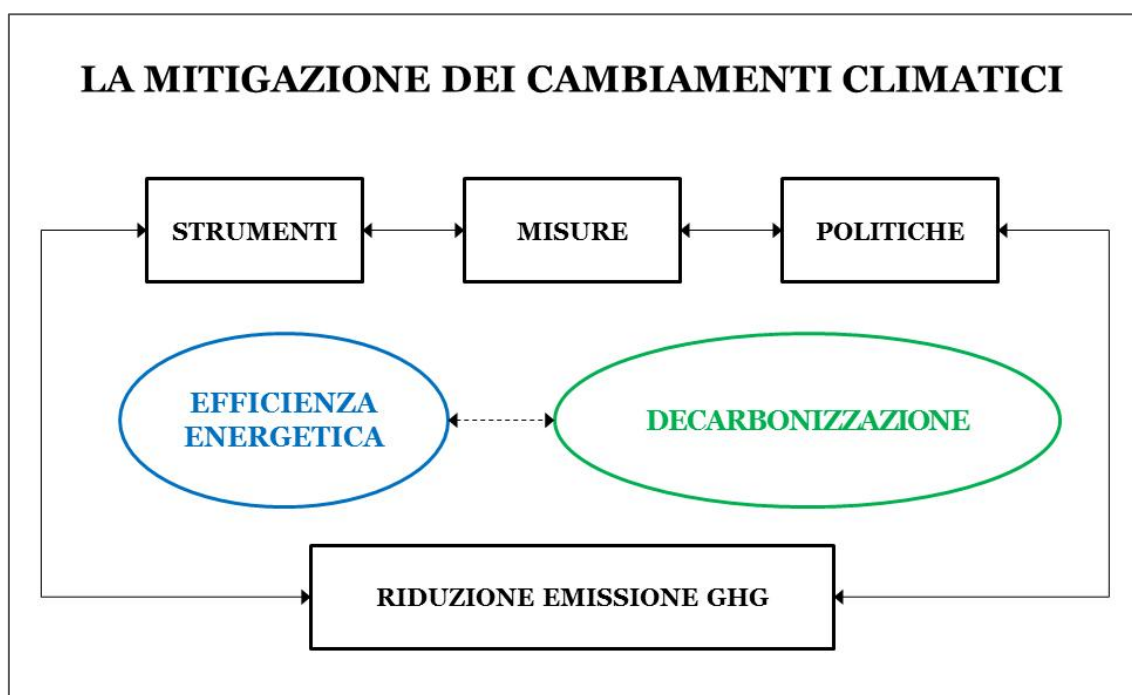


Figura 6 - Schema esemplificativo delle azioni da mettere in essere nell'ambito della mitigazione del CC (elaborazione su IPCC, 2015).

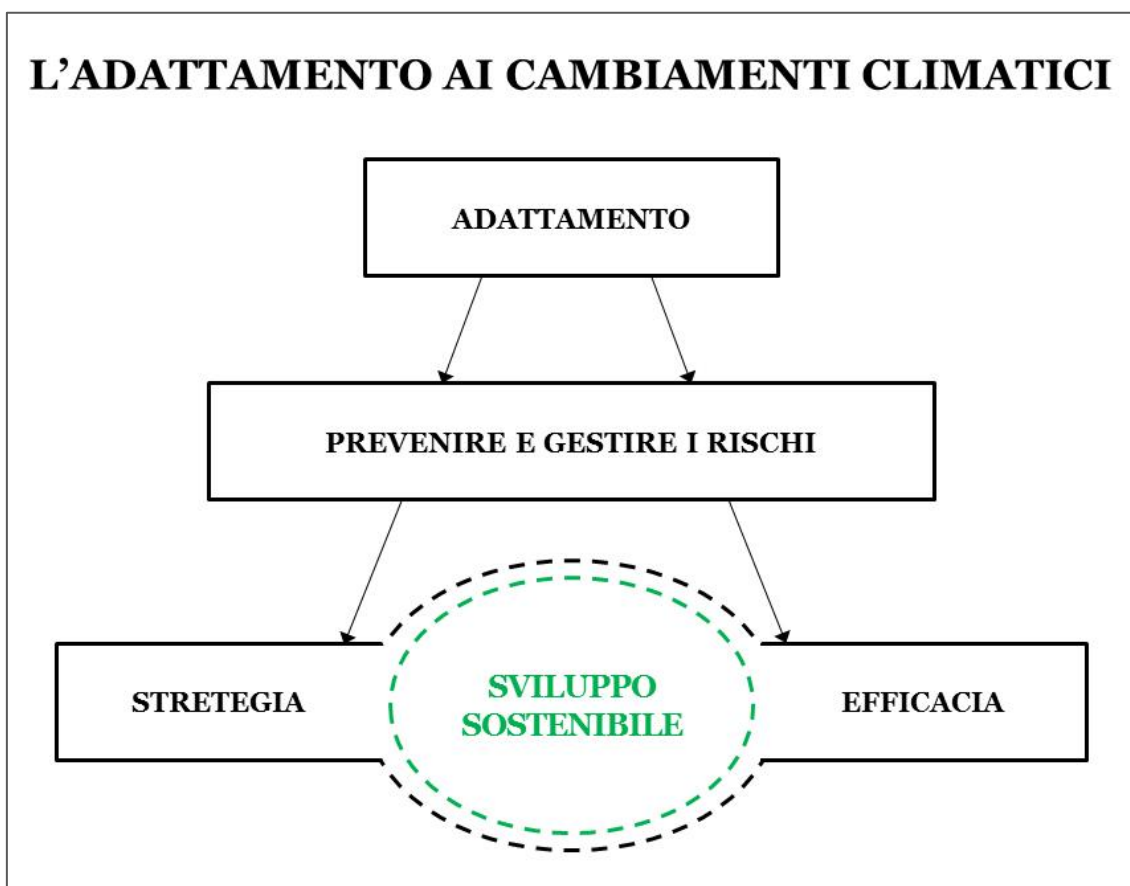


Figura 7 - Schema esemplificativo delle azioni da mettere in essere nell'ambito dell'adattamento al CC (elaborazione su IPCC, 2015).

Tale scelta, secondo l'Agenzia delle Nazioni Unite per la Riduzione dei Disastri (UNISDR), condurrà certamente ad affrontare costi considerevoli ma, anche limitandosi ad analizzare il solo aspetto finanziario e senza considerare i benefici connessi (ambiente, salute, etc.), l'investimento di denaro per rendere il territorio meno vulnerabile e più resiliente risulterà in ogni caso conveniente dal momento che non agire ora significa danneggiare ulteriormente le economie mondiali e peggiorare i conti pubblici futuri (UNISDR, 2015).

La Strategia Europea di Adattamento ai cambiamenti climatici

Nell'aprile 2013, la Commissione Europea (EC) ha presentato la *Strategia Europea di Adattamento ai cambiamenti climatici* (SEACC), introducendo così un quadro normativo mirato a rendere l'Unione Europea sempre più pronta ad

affrontare gli impatti dei cambiamenti climatici, attraverso un sostegno agli Stati Membri, alle organizzazioni transnazionali e agli operatori locali con adeguate azioni a livello regionale.

La strategia si basa su tre principali obiettivi:

- 1) Promuovere e supportare l'azione da parte degli Stati Membri, mettendo a disposizione fondi per migliorare le loro capacità di adattamento e sostenendo gli sforzi delle città in tal senso, invitandole a sottoscrivere un impegno su modello del *Patto dei Sindaci*⁶;
- 2) Assicurare processi decisionali informati, colmando le lacune nelle conoscenze in fatto di adattamento e dando maggiore impulso alla piattaforma europea sull'adattamento ai cambiamenti climatici (Climate-ADAPT);
- 3) Promuovere l'adattamento nei settori particolarmente vulnerabili, facendo sì che l'Europa possa contare su infrastrutture più resilienti e promuovendo l'uso delle assicurazioni e di schemi statali di copertura del rischio, per la tutela contro le catastrofi.

La città ha un ruolo rilevante nella SEACC. La Commissione Europea ha previsto di sostenere l'adattamento delle città al *climate change* lanciando un'iniziativa, basata sul modello del Patto dei Sindaci, attraverso cui le autorità locali possono offrirsi volontariamente per adottare strategie di adattamento locali e attività di sensibilizzazione.

La strategia è costituita da una serie di documenti fra cui la Comunicazione della Commissione Europea, *An EU Strategy on adaptation to climate change*, che specifica le azioni da intraprendere nelle tre aree prioritarie sintetizzate in precedenza. La Comunicazione è accompagnata da dodici documenti che affrontano il tema dell'adattamento in specifici settori e aree politiche (migrazioni, aree marine e costiere, salute, infrastrutture, agricoltura, politiche di coesione e assicurazioni) e da linee guida per la preparazione delle strategie nazionali e locali di adattamento.

⁶ Il Patto dei Sindaci è il principale movimento europeo che vede coinvolte le autorità locali e regionali che si impegnano volontariamente ad aumentare l'efficienza energetica e l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili nei loro territori. Attraverso il loro impegno i firmatari del Patto intendono raggiungere e superare l'obiettivo europeo di riduzione del 20% delle emissioni di anidride carbonica entro il 2020.

È bene, comunque, ricordare che a livello internazionale, seppure con le opportune differenze, già dalla metà della prima decade del XXI secolo, numerosi Stati come la Finlandia (2005), la Spagna (2006) e la Francia (2007), avevano strutturato una propria strategia di adattamento al *climate change*.

Le politiche a scala nazionale sono state affiancate da esperienze di redazione di Piani di adattamento climatico a scala locale.

Il *Cities Climate Leadership Group* (C40) è la più importante iniziativa che mette in rete le principali aree urbane per la realizzazione di politiche che promuovono allo stesso tempo la mitigazione dei cambiamenti climatici e strategie di adattamento. La rete è composta da 83 metropoli e grandi città che condividono le esperienze compiute nell'ambito del contrasto ai cambiamenti climatici.

Dai rapporti divulgati dal C40 si apprende come le misure di adattamento al *climate change* siano sensibilmente aumentate dal 2011 al 2015 nelle città appartenenti alla rete e come il 52% di esse abbia creato uffici municipali focalizzati sul tema dell'adattamento al *climate change* (C40, 2015a). Alcune metropoli, inoltre, hanno redatto o stanno attuando il proprio Piano di adattamento al cambiamento climatico, ognuno dei quali si distingue per una particolare attenzione all'impatto predominante che minaccia la realtà locale.

Nel 2012, ad esempio, la città di Rotterdam ha adottato la propria *Adaptation Strategy* volta a limitare gli effetti delle inondazioni a cui è soggetto il 55% del territorio municipale, inserendo misure di adattamento in ogni progetto pubblico.

Nello stesso anno Vancouver, realtà fortemente esposta al rischio derivante dall'innalzamento dei mari, ha adottato una strategia di adattamento di cui è parte integrante uno studio di valutazione sul rischio da inondazione costiera.

Sempre nel 2012, la città di Copenhagen, avendo osservato un incremento di temporali ed acquazzoni, ha redatto un piano di gestione degli eventi meteorici estremi programmando la realizzazione di 300 progetti comprendenti superfici vegetate e di drenaggio e sette aree di raccolta disseminate per la città.

Sydney, al fine di salvaguardare la città dai molteplici rischi derivanti dal cambiamento climatico, ha adottato una *Climate Adaptation Strategy*, contraddistinta da un approccio collaborativo e inclusivo verso tutti gli enti

istituzionali con giurisdizione sul territorio municipale. Molte azioni della strategia sono state già realizzate, come una massiva azione di forestazione urbana (10.250 alberi piantati), la realizzazione di parchi urbani per contrastare la siccità, l'installazione in alcuni punti della città di pavimentazioni ad albedo elevata per contrastare l'isola di calore urbana (C40, 2015b) (Figura 8).

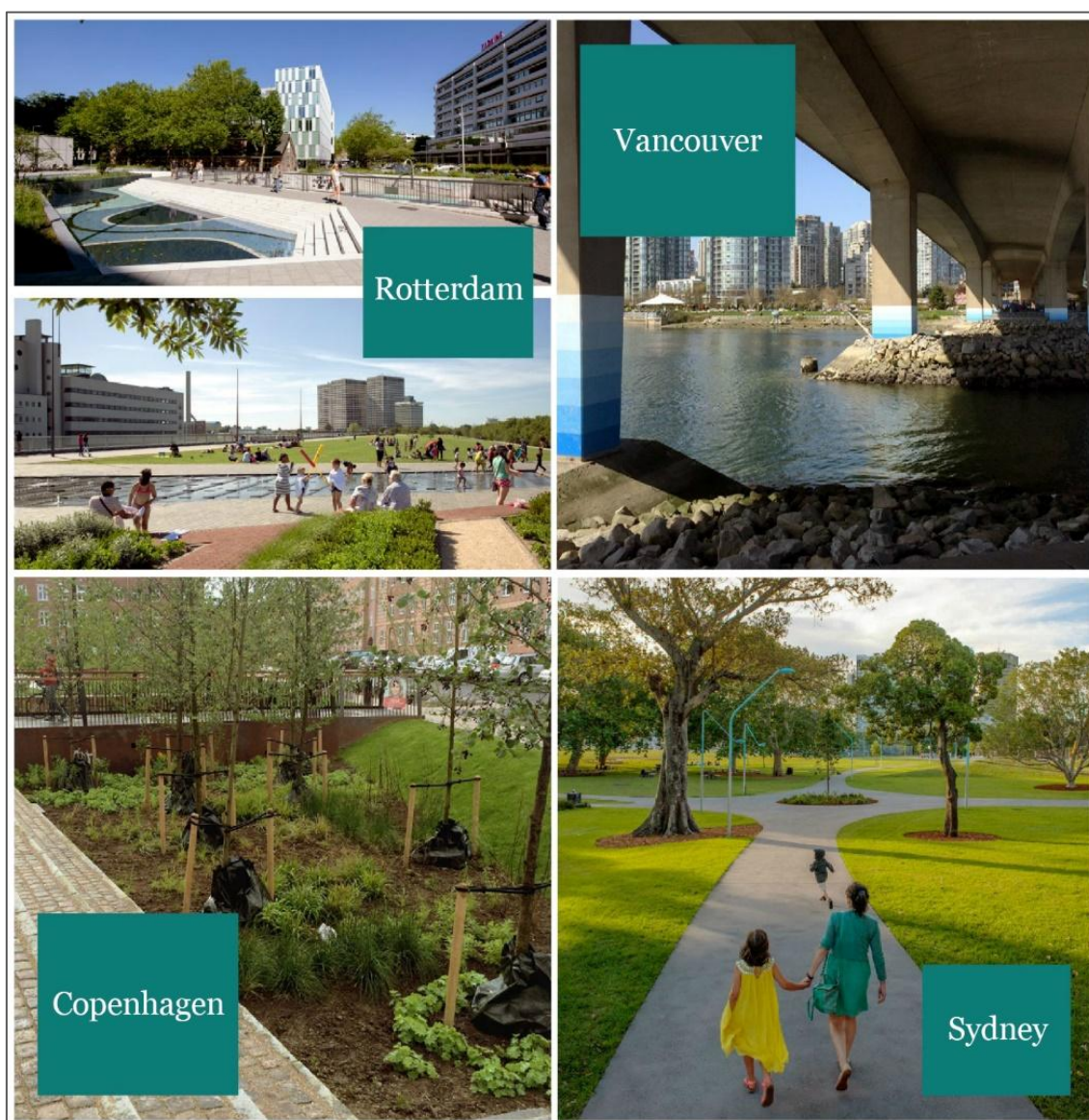


Figura 8 - Esempi di alcune azioni concrete messe in atto nelle città afferenti alla rete C40 nell'ambito del proprio Piano di adattamento al *climate change*.

La Strategia Nazionale di Adattamento al *climate change*

Una varietà di attività autonome e pianificate per adattarsi ai cambiamenti climatici è stata intrapresa su scala nazionale, regionale e locale in tutta Europa (EEA, 2013). Tali attività si possono presentare svincolate da quadri d'azione nazionale e non sempre etichettate come “adattamento” nonostante contribuiscano a promuovere la resilienza dei territori e a ridurre la vulnerabilità degli stessi ai cambiamenti climatici. Misure che incentivano l'adattamento sono spesso avviate all'interno di politiche settoriali esistenti, come la prevenzione di disastri naturali, le strategie di difesa costiera, la protezione dell'ambiente e la gestione sostenibile delle risorse. Per quanto concerne l'adattamento pianificato a livello nazionale, le strategie di adattamento sono considerate dalla Commissione Europea lo strumento più efficace per preparare gli Stati Membri a valutare gli effetti, la vulnerabilità e le opzioni di adattamento e quindi ad affrontare gli impatti previsti dei cambiamenti climatici in tutti i settori.

A differenza della mitigazione però, non esiste un'unica politica per l'adattamento che possa essere applicata a tutti i Paesi. Ogni Stato Membro sperimenterà diversi impatti dei cambiamenti climatici, a fronte di una vulnerabilità specifica per Paese, derivata da caratteristiche ambientali, sociali ed economiche. Inoltre, le modalità secondo cui l'adattamento viene progettato e realizzato dipende dal particolare sistema di governo di ciascuno Stato Membro.

L'adattamento è caratterizzato da aspetti di multi-settorialità e inter-settorialità, poiché affrisce a diversi settori economici i quali sono largamente interconnessi. Inoltre, l'adattamento è multi-livello, poiché tocca sfere di competenze trasversali a diverse scale di *governance*: dal livello europeo, a quello nazionale e locale (EEA, 2013). L'integrazione orizzontale e verticale dell'adattamento devono essere quindi coordinate o consentite dal potere esecutivo o legislativo di un Paese (EEA, 2013b).

Nell'ottobre 2014 la Conferenza Unificata delle Regioni e Provincie autonome ha approvato la *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (SNACC), documento redatto dal Ministero dell'Ambiente che delinea la

strategia di azioni finalizzate alla riduzione dell'impatto dei cambiamenti climatici verso l'ambiente ed il sistema socio-economico nazionale. La SNACC dovrà poi essere declinata dalle Regioni, in modo da potersi conformare a specifici contesti e agli elementi sensibili a livello locale.

Propedeutica alla SNACC è stata la redazione del documento *Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici*, che individua i principali settori suscettibili di subire impatti rilevanti a causa del cambiamento climatico e che propone gli obiettivi strategici e le azioni che – in funzione delle specificità locali – potranno essere declinati a livello locale.

Gli *Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* contengono una *vision* sui percorsi e sulle modalità per affrontare gli impatti del cambiamento climatico, per individuare un insieme di azioni da porre in essere al fine di ridurre al minimo i diversi tipi di rischi, per proteggere la salute e il benessere dei cittadini, per mantenere la funzionalità dei sistemi naturali, sociali ed economici.

Essendo gli insediamenti urbani uno dei nodi maggiormente critici dell'adattamento climatico, gli enti locali sono chiamati a svolgere un ruolo decisivo a riguardo. Gli *Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* propongono per gli insediamenti urbani una serie di azioni di adattamento, articolate secondo la distinzione ormai canonica tra *soft*, *green* e *grey*:

- A) *Azioni soft* (studi, ricerche, sistemi di monitoraggio, sistemi di allerta, ri-orientamento modale e pianificazione territoriale per ridurre la domanda di infrastrutture)
- incentivare la ricerca sui cambiamenti climatici in una logica di *downscaling*;
 - promuovere la formazione di Strategie e di Piani di adattamento urbani nel contesto dell'iniziativa *Mayors Adapt*;
 - promuovere, sul modello europeo della piattaforma Climate-ADAPT, lo scambio di esperienze e la diffusione delle *best practices*;
 - verificare le previsioni degli strumenti di governo del territorio vigenti;
 - integrare gli atti di regolazione delle trasformazioni urbane e di gestione degli insediamenti esistenti;

- elaborare linee guida per l'adattamento climatico a scala locale;
- incrementare la consapevolezza dei cittadini, delle imprese e degli *stakeholder*;
- incentivare la ricerca scientifica in materia di adattamento climatico della città esistente.

B) *Azioni green* (adattamento preventivo attraverso la costruzione di infrastrutture verdi e resilienti)

- favorire e incentivare la diffusione dei tetti verdi e l'incremento del verde pubblico e privato, anche a fini di attenuare i fenomeni estremi di calore estivo;
- incrementare la dotazione del verde urbano adottando la logica delle *green and blue infrastructures*;
- realizzare, anche a fini dimostrativi e di sensibilizzazione dei cittadini, interventi sperimentali di adattamento climatico di spazi pubblici in quartieri particolarmente vulnerabili;
- favorire, nell'ambito delle *green and blue infrastructures*, la diffusione degli orti urbani.

C) *Azioni grey* (costruzione di opere di difesa)

- prevenire l'incremento dei rischi idraulici e geomorfologici;
- intervenire nelle aree idraulicamente critiche degli insediamenti;
- selezionare e programmare la spesa per opere pubbliche, soprattutto infrastrutturali, privilegiando la messa in sicurezza di quelle esistenti di importanza strategica e la loro funzionalità nel corso di eventi estremi;
- incrementare le dotazioni infrastrutturali per la mobilità ciclabile e pedonale;
- favorire la sperimentazione di nuovi modelli insediativi capaci di far fronte ai cambiamenti climatici.

È del tutto evidente che, per governare una manovra di tale ampiezza, sarà necessario uno sforzo di coordinamento e di programmazione innovativo e, per questo, dagli esiti non scontati (Filpa, Ombuen, 2013).

In alcune realtà italiane – si veda, ad esempio Bologna, con il progetto BLUEAP – si sta già sperimentando la redazione di Piani di adattamento locali che, sulla scorta di esperienze da tempo maturate a livello internazionale, mirano ad

orientare l'azione pubblica e privata in una sfida che prevedibilmente occuperà per lungo tempo un ruolo di massimo rilievo nelle agende urbane.

PARTE II

Città e clima



CAPITOLO 4 - Il clima urbano

Premessa

Gli elementi climatici quali radiazione solare, temperatura, ventilazione sono influenzati da fattori geografici naturali ed essi, combinandosi con questi ultimi, determinano il clima di uno specifico sito (cfr. Capitolo 1).

Gli stessi elementi climatici, tuttavia, non risultano modificabili dalle sole caratteristiche ‘naturali’ di un luogo. I tessuti urbanizzati, infatti, sono in grado di alterare la temperatura e l’umidità dell’aria, il profilo e la struttura dei regimi di circolazione del vento dei luoghi in cui sorgono. In altre parole, i caratteri morfologici e fisico-costruttivi degli insediamenti urbani sono responsabili della creazione di un particolare regime climatico, definito *clima urbano*, caratterizzato da particolari fenomeni determinati dall’interazione tra assetto costruito e fattori climatico-ambientali.

Il processo di modifica delle condizioni atmosferiche da parte delle città è oggetto di una vastissima letteratura scientifica riferita a diverse aree urbane collocate nelle più varie regioni climatiche del pianeta, dalle zone desertiche alle medie e alte latitudini (Munn, 1966; Oke, 1978; Stull, 1997).

Al fine di comprendere il suddetto processo è opportuno descrivere i fenomeni di interazione tra il suolo e l’atmosfera facendo emergere le differenze sostanziali tra suolo naturale e suolo urbano nella alterazione delle grandezze fisiche in gioco.

Struttura dello strato limite atmosferico

Le caratteristiche chimico-fisiche che contraddistinguono l’atmosfera terrestre non sono omogenee. Essa è, infatti, caratterizzata dalla presenza di diverse *stratificazioni* sovrapposte le une alle altre, ognuna con caratteristiche ben definite. Di tutti questi strati, quello su cui è opportuno concentrare l’attenzione è lo strato di atmosfera a diretto contatto con la superficie terrestre cioè la *Troposfera*, strato caratterizzato da un pressoché continuo gradiente negativo di temperatura: essa

diminuisce all'aumentare della distanza dal suolo sino ad una discontinuità che si verifica a circa 2000 metri.

Lo strato di atmosfera compreso tra il suolo e detta discontinuità prende il nome di Strato Limite Planetario, *Planetary Boundary Layer* (PBL), o anche Strato Limite Atmosferico, *Atmospheric Boundary Layer* (ABL).

L'ABL è stato definito come quella porzione di troposfera direttamente influenzata dalla superficie terrestre e che risponde alle immissioni di energia da essa provenienti con scale temporali dell'ordine dell'ora.

Le interazioni tra la superficie terrestre e le masse d'aria all'interno dell'ABL presentano differenze significative se il suolo risulta urbanizzato o meno.

Le masse d'aria che, provenendo da un'area rurale, scorrono sopra una zona urbanizzata, infatti, incontrano discontinuità, legate alla presenza delle costruzioni, che determinano perturbazioni nella struttura dell'ABL. Si sviluppa, pertanto, uno strato limite interno all'ABL, noto come *Strato limite urbano*, *Urban Boundary Layer* (UBL).

L'UBL contiene un ulteriore strato detto Substrato di rugosità, *Roughness sublayer* (RSL) definibile come quello in cui il flusso e la turbolenza sono direttamente influenzati dalla presenza di edifici ed assumono quindi una struttura variabile nelle tre dimensioni; si estende dalla superficie fino ad una quota z_r che dipende dall'altezza e dalla densità degli elementi di rugosità e che, nelle aree centrali di molte città europee, è pari al doppio dell'altezza media degli edifici.

Al di sotto dell'UBL, a causa dell'interazione tra la superficie determinata dall'involuppo delle strutture edificate che compongono la città e l'aria sovrastante, si forma un ulteriore strato d'aria con differenti caratteristiche microclimatiche, chiamato *Urban Canopy Layer* (UCL). L'UCL, dunque, ha uno spessore che va dal suolo fino all'altezza media degli edifici z_H . Tipicamente, l'UCL è contraddistinto dalla presenza di *canyon urbani*, corrispondenti alle arterie viarie costeggiate da cortine edilizie continue, all'interno delle quali si sviluppano vortici trasversali rispetto all'asse, e le cui condizioni termiche dipendono dalla frazione di cielo visibile, o *sky-view factor*⁷;

⁷ Per approfondire i concetti di canyon urbano e *sky-view factor* si vedano i Capitoli 5 e 7.

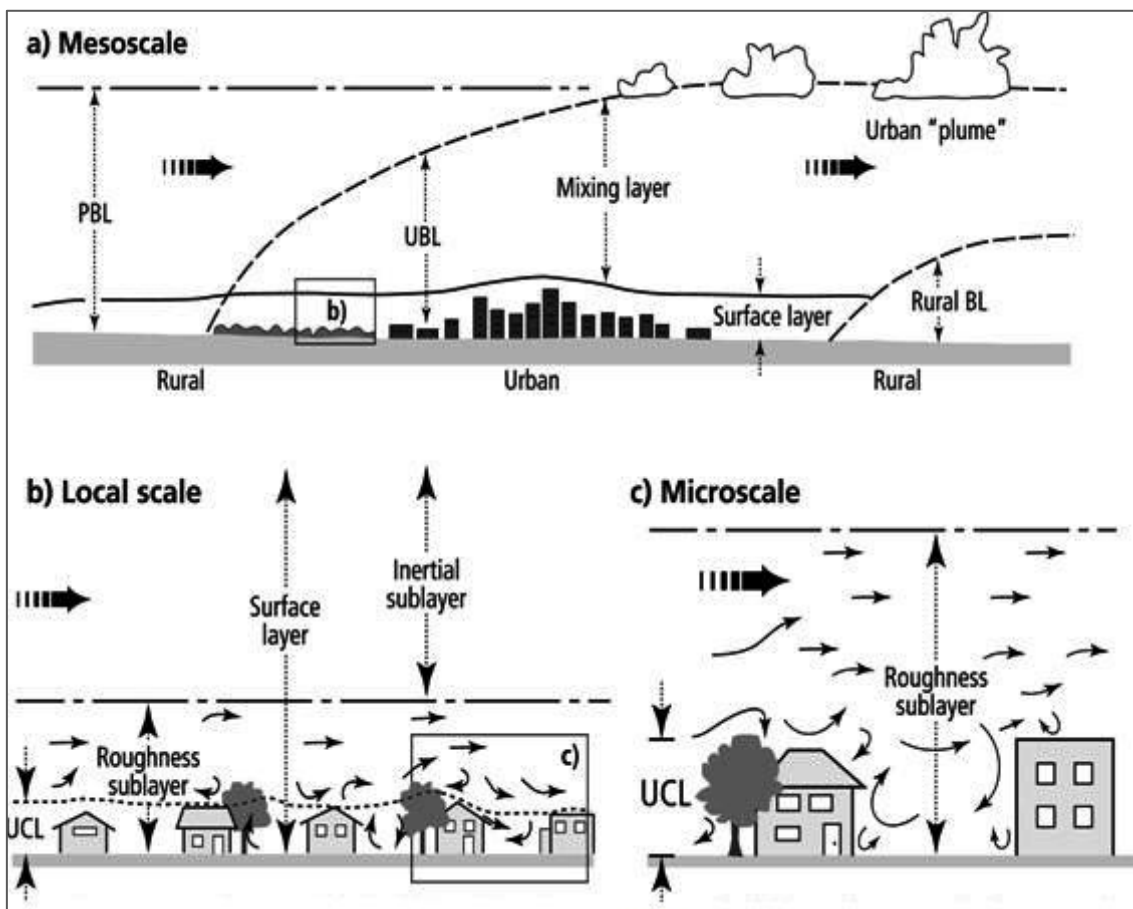


Figura 9 - Schema della struttura dell'ABL (Oke, 2006).

Quando la massa d'aria lascia la città ed incontra nuovamente un'area rurale si svilupperà un nuovo strato limite interno (*Rural Boundary Layer*), la cui forma è influenzata dalla direzione del vento (Bonafé, 2006) (Figura 9).

Come sarà illustrato nei paragrafi successivi, il processo di urbanizzazione determina, dunque, un'alterazione dell'ABL e la creazione dell'UCL. Inoltre, l'impermeabilizzazione delle suolo altera il bilancio radiativo della superficie terrestre contribuendo all'incremento di temperatura della città, ulteriormente accresciuta, infine, da particolari configurazioni morfologiche dei tessuti urbani che producono trappole per la radiazione solare e stagnazioni dell'aria.

Alterazione del profilo del vento

Nell'ABL, in condizioni di suolo non urbanizzato, la velocità del vento cresce approssimativamente con il logaritmo della quota z secondo la relazione:

$$\bar{M} = \left(\frac{u^*}{k}\right) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

dove

\bar{M} è l'intensità media del vento;

u^* è l'intensità della turbolenza meccanica originata dall'attrito tra suolo e atmosfera⁸;

k è la Costante di Von Karman ed è pari a 0,4;

z_0 è la *lunghezza di rugosità aerodinamica* che dipende dalle caratteristiche geometriche della superficie. Suoli urbanizzati presentano valori di z_0 di due ordini di grandezza superiori rispetto a terreni agricoli (**Tabella 1**).

Al di sopra di un'area coperta da ostacoli aerodinamici di dimensioni rilevanti e disposti in una struttura compatta (alberi o edifici), la formulazione del profilo medio di un vento è effettuata sullo schema del profilo logaritmico in condizioni di suolo non urbanizzato, introducendo un nuovo parametro, la *distanza di spostamento* z_d :

$$\bar{M} = \left(\frac{u^*}{k}\right) \ln\left(\frac{z - z_d}{z_0}\right)$$

Tabella 1 - Valori tipici della lunghezza di rugosità aerodinamica (Bonafè, 2006).

Copertura del terreno	Valori tipici di z_0
aree urbane	0,5 ÷ 2 m
aree suburbane	0,3 ÷ 0,5 m
foreste	0,5 ÷ 1 m
terreni agricoli	2 ÷ 10 cm
terreni erbosi	0,5 ÷ 5 cm
mare mosso	1 mm
mare calmo	0,1 mm

⁸ La turbolenza è una caratteristica fondamentale dell'ABL, e consiste nella presenza di vortici e onde, di dimensioni variabili da pochi millimetri a più di un chilometro, che interagiscono fra loro. La turbolenza è responsabile del trasporto verticale di energia termica, energia meccanica, umidità, anidride carbonica, inquinanti (Bonafè, 2006).

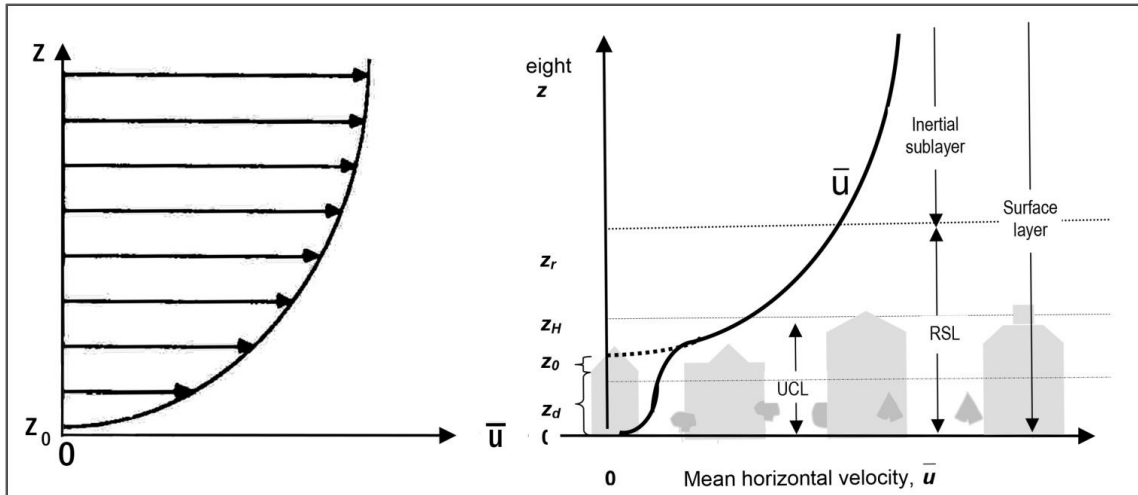


Figura 10 - Confronto tra il profilo logaritmico di velocità del vento in condizioni neutre (Stull, 1988) e in condizioni di suolo urbanizzato (WMO, 2006).

z_d dipende dall'altezza media degli edifici e dalla loro densità. Come accennato in precedenza, nelle città europee il rapporto z_d/z_H presenta valori tipici compresi tra 0,5 e 0,9 (Rotach, 1992) (Figura 10).

Alterazione del bilancio di calore e del bilancio radiativo alla superficie

Gli scambi di calore tra suolo e atmosfera sono responsabili delle condizioni microclimatiche in prossimità del suolo in quanto modificano temperatura ed umidità dell'aria.

In prima approssimazione, trascurando le modifiche indotte dalle aree urbanizzate, il bilancio di calore alla superficie è esprimibile secondo la formulazione proposta da Stull:

$$-Q_s^* = Q_H + Q_E - Q_G$$

dove

$-Q_s^*$ è la radiazione netta;

Q_H è il flusso di calore sensibile, ovvero lo scambio di calore determinato dai movimenti verticali dell'aria;

Q_E è il flusso di calore latente, ovvero lo scambio di calore tra suolo e atmosfera e viceversa che si verifica attraverso i cambiamenti di stato dell'acqua (evaporazione, condensazione, congelamento, sublimazione);

Q_G è il flusso di calore molecolare dal suolo sottostante;

I flussi di calore hanno valori diversi in condizioni diurne e notturne, e sono variabili a seconda della stagione, delle condizioni meteorologiche, del contenuto d'acqua nel terreno, del tipo di copertura del suolo.

A mezzogiorno di una giornata di sole, $-Q_s^*$ risulterà positivo in quanto la radiazione solare globale è maggiore di quella che il suolo riflette ed emette verso l'atmosfera. Q_H e Q_E sono positivi, poiché calore sensibile e umidità sono ceduti dal suolo verso l'atmosfera. $-Q_G$ è positivo poiché la superficie cede calore al suolo sottostante per conduzione molecolare.

Viceversa, in condizioni notturne $-Q_s^*$ risulta essere spesso negativo in quanto il suolo continua a emettere radiazioni infrarosse, anche quando non riceve più radiazione solare. Q_H è negativo poiché l'aria cede calore al suolo così come è negativo Q_E nel processo di cambio di stato del vapore acqueo che conduce alla formazione di rugiada e brina. Anche $-Q_G$ cambia segno, divenendo negativo; è, infatti, il terreno sottostante a cedere calore alla superficie.

Il rapporto β tra il flusso di calore sensibile e il flusso di calore latente è definito

Rapporto di Bowen:

$$\beta = \frac{Q_H}{Q_E}$$

Esso indica la diversa incidenza delle due grandezze suindicate e dipende dall'umidità disponibile nel suolo, dal tipo di suolo e dalla copertura del terreno.

Il Rapporto di Bowen rappresenta un parametro significativo poiché la sua riduzione, ovvero la trasformazione di parte del flusso sensibile in latente, può contribuire a modificare il bilancio energetico superficiale contribuendo alla mitigazione dell'isola di calore urbana (cfr. Capitolo 5).

Difatti, se $\beta > 1$, $Q_H > Q_E$ e il canale preferenziale per dissipare calore è Q_H . È il caso di superfici con limitata disponibilità idrica, come le superfici urbane

impermeabilizzate. La temperatura al di sopra delle suddette superfici è destinata, dunque, ad aumentare.

Invece, se $\beta < 1$, $Q_H < Q_E$ e il canale preferenziale per dissipare calore risulta Q_E . Ciò si verifica quando nel suolo è presente una quantità di acqua apprezzabile, come nel caso di superfici vegetate (Tabella 2). In tal caso, non si ha un riscaldamento dell'atmosfera ma un incremento dell'umidità dell'aria al di sopra della superficie.

Il bilancio di calore alla superficie può essere, altresì, espresso in termini radiativi. La radiazione netta Q_s^* può essere, infatti, considerata come la somma di quattro componenti, secondo l'identità proposta da Stull:

$$Q_s^* = K \uparrow + K \downarrow + I \uparrow + I \downarrow$$

dove

$K \uparrow$ è la radiazione solare globale riflessa dalla superficie;

$K \downarrow$ è la radiazione solare globale incidente sulla superficie;

$I \uparrow$ è la radiazione infrarossa riflessa ed emessa dalla superficie;

$I \downarrow$ è la radiazione infrarossa diffusa dall'atmosfera verso la superficie.

La radiazione solare riflessa $K \uparrow$ è legata alla radiazione solare incidente $K \downarrow$ dalla seguente legge di proporzionalità:

$$K \uparrow = -a \cdot K \downarrow$$

Dove a è la frazione di radiazione solare riflessa dalla superficie, chiamata *albedo*.

Tabella 2 - Valori tipici del Rapporto di Bowen (Stull, 1988).

Copertura del terreno	Valori tipici di β
Regioni semi-aride	5
Terreni erbosi	0,5
Foreste	0,5
Terreni erbosi irrigati	0,2
Mare	0,1

L'albedo è dipendente dal tipo di copertura del suolo e dall'angolo di incidenza (Tabelle 3, 4).

La radiazione infrarossa uscente $I \uparrow$ è somma della parte riflessa e della parte emessa dalla superficie:

$$I \uparrow = I \uparrow_{riflessa} + I \uparrow_{emessa}$$

La radiazione infrarossa uscente riflessa è proporzionale alla radiazione infrarossa entrante secondo la seguente relazione:

$$I \uparrow_{riflessa} = -a_{IR} \cdot I \downarrow$$

dove

a_{IR} è la frazione radiazione infrarosso riflessa dalla superficie, chiamata *riflettanza infrarossa*.

La radiazione infrarossa uscente emessa è, invece, proporzionale alla radiazione infrarossa entrante secondo la seguente relazione:

$$I \uparrow_{emessa} = \varepsilon_{IR} \cdot q = \varepsilon_{IR} \cdot \sigma T^4$$

dove

ε_{IR} è la frazione di radiazione infrarossa emessa dalla superficie, chiamata *emissività infrarossa*, complementare a 1 della riflettanza infrarossa a_{IR} , entrambe dipendenti dalle caratteristiche della superficie (Tabelle 3, 4);

q è l'emittanza termica, espressa dalla relazione di Stefan-Boltzman;

σ è la costante di Stefan-Boltzman pari a $5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$;

T è la temperatura della superficie

In definitiva, la radiazione infrarossa uscente è descritta dalla relazione seguente:

$$I \uparrow = -(1 - \varepsilon_{IR}) \cdot I \downarrow + \varepsilon_{IR} \cdot \sigma T^4$$

Tabella 3 - Valori tipici di albedo ed emissività infrarossa di superfici naturali (Stull, 1988; Anthes et al., 1987).

Copertura del terreno	Valori tipici di albedo		Valori tipici di emissività infrarossa
	<i>estiva</i>	<i>invernale</i>	
Terreni agricoli	0,17	0,23	0,92
Terreni erbosi	0,19	0,23	0,92
Foreste decidue	0,16	0,17	0,93
Foreste di conifere	0,12	0,12	0,95
Aree umide	0,14	0,14	0,95

Tabella 4 - Valori tipici di albedo ed emissività infrarossa di superfici artificiali (Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Civile - Università di Modena e Reggio Emilia).

Materiale	Valori tipici di albedo	Valori tipici di emissività infrarossa
Membrana bituminosa nera	< 0,10	0,90 ÷ 0,98
Membrane polimeriche tradizionali di colore bianco	> 0,70	> 0,90
Coperture metalliche (alluminio, rame) verniciate chiare	> 0,80 ÷ 0,90	> 0,60 ÷ 0,70
Piastrelle e lastre in pietra	> 0,70 ÷ 0,80	> 0,90
Tegole e mattoni in terracotta	< 0,30	0,93 ÷ 0,96

Il bilancio radiativo della superficie è esprimibile con la relazione completa di seguito riportata:

$$Q_s^* = (1 - a) \cdot K \downarrow + \varepsilon_{IR} \cdot (I \downarrow + \sigma T^4)$$

La radiazione netta Q_s^* è, dunque, funzione della radiazione solare globale incidente $K \downarrow$ e della radiazione infrarossa $I \downarrow$ diffusa dall'atmosfera verso la superficie.

È facile osservare come, a parità di $K \downarrow$ e di $I \downarrow$, Q_s^* presenti un valore maggiore nel caso di terreno urbanizzato (ad esempio, asfalto) a causa di una minore albedo a e una pressoché simile emissività ε_{IR} dello stesso rispetto ad un terreno agricolo.

Uguagliando la formulazione della radiazione netta nel bilancio radiativo e nel bilancio di calore si ottiene:

$$Q_s^* = K \uparrow + K \downarrow + I \uparrow + I \downarrow = Q_H + Q_E + Q_G$$

Tali due formulazioni risultano pienamente valide per un'area rurale (Figura 11). Nel caso di un'area urbanizzata, è necessario introdurre due nuovi termini all'equazione del bilancio di calore:

$$Q_s^* = K \uparrow + K \downarrow + I \uparrow + I \downarrow = Q_H + Q_E + Q_G + Q_F + \Delta Q_S$$

dove

Q_F è il *flusso di calore antropogenico*, sorgente aggiuntiva di calore causata dalle attività umane e dai consumi energetici che esse comportano quali traffico, scarichi industriali, condizionamento degli edifici, produzione e consumo di energia elettrica. Tale valore, dunque, varia considerevolmente all'interno di un'area urbana e al variare della dimensione della città. Nel centro finanziario di una grande area metropolitana americana Q_F può raggiungere valori di 1500 W/m^2 nel periodo invernale, mentre in climi miti, in cui il riscaldamento e gli impianti di condizionamento rappresentano una quota esigua del consumo di energia, Q_F può oscillare dai 5 W/m^2 di un'area periurbana ai 25 W/m^2 del centro città (Erell et al., 2011).

ΔQ_S è il *flusso di calore immagazzinato*, e non compare nel bilancio energetico delle superfici naturali in quanto, in tal caso, assume valori trascurabili. ΔQ_S dipende dai materiali e dalla geometria della struttura urbana, ma soprattutto dalla densità degli edifici (Tabella 5).

ΔQ_S , è esprimibile come una funzione della frazione di spazi verdi λ_V e della frazione di aree edificate λ_P , secondo la formulazione proposta da Oke:

$$\begin{aligned} \Delta Q_S &= (0,20 \cdot \lambda_V + 0,33 \cdot \lambda_P) \cdot Q_s^* + 3\lambda_V + 24\lambda_P & (\text{diurno}) \\ \Delta Q_S &= (0,54 \cdot \lambda_V + 0,90 \cdot \lambda_P) \cdot Q_s^* & (\text{notturno}) \end{aligned}$$

Tabella 5 - Incidenza del flusso di calore immagazzinato rispetto alla radiazione netta rilevato per la città di Nagoya (JPN), al variare dell'uso del suolo, delle stagioni e dell'ora del giorno (Kato, 2007).

Uso del suolo	Mese del rilevamento	$\Delta Q_s/Q_s^*$
Urbano-commerciale (51% commerciale, 43% viabilità)	Luglio	0,80
	Gennaio	0,91
	Settembre (notte)	1,20
Urbano-residenziale (64% residenziale, 18% viabilità)	Luglio	0,64
	Gennaio	0,70
	Settembre (notte)	1,11
Rurale (71% campi coltivati, 13% viabilità)	Luglio	0,59
	Settembre (notte)	0,97
Rurale (93% risaie)	Luglio	0,58
	Settembre (notte)	0,97

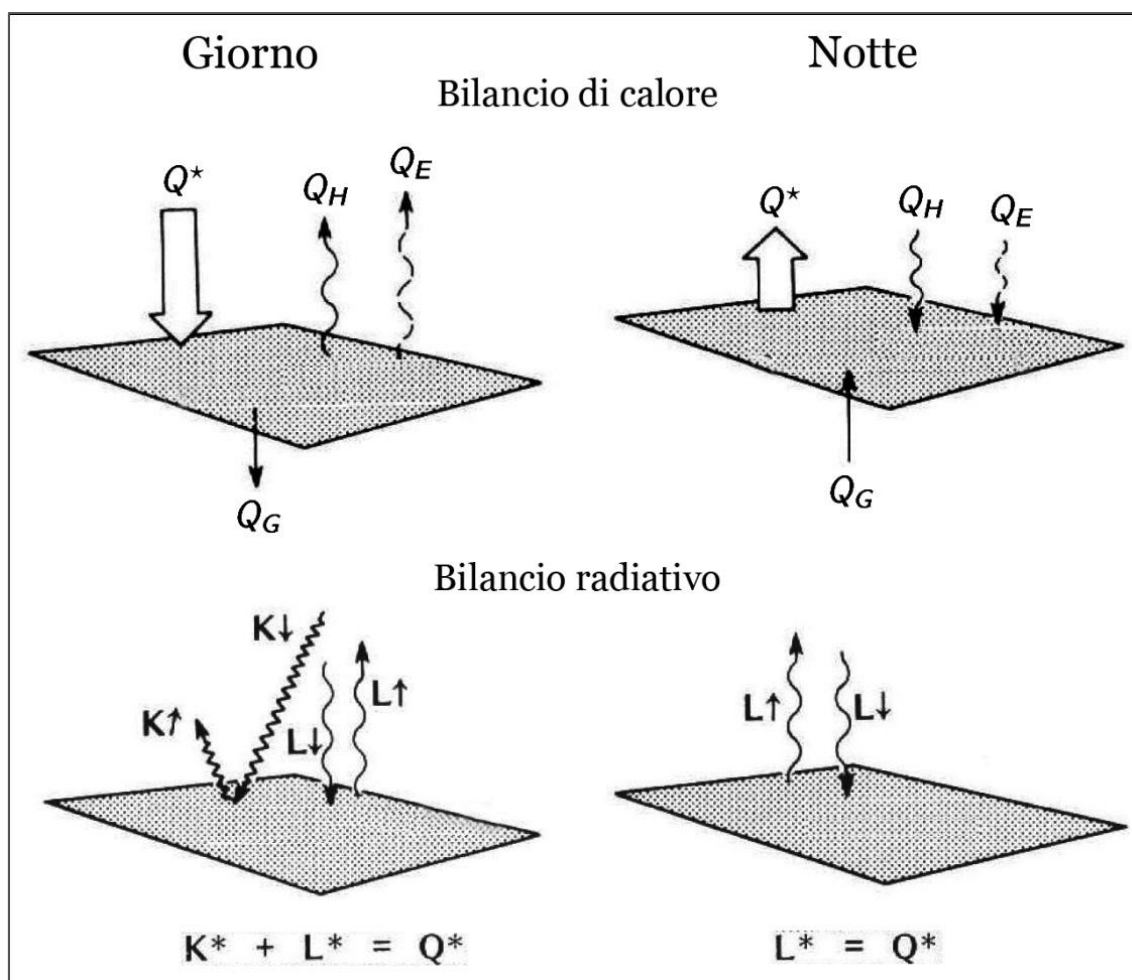


Figura 11 - Rappresentazione schematica delle equazioni di bilancio di calore e radiativo della superficie (elaborazione su Oke, 1987).

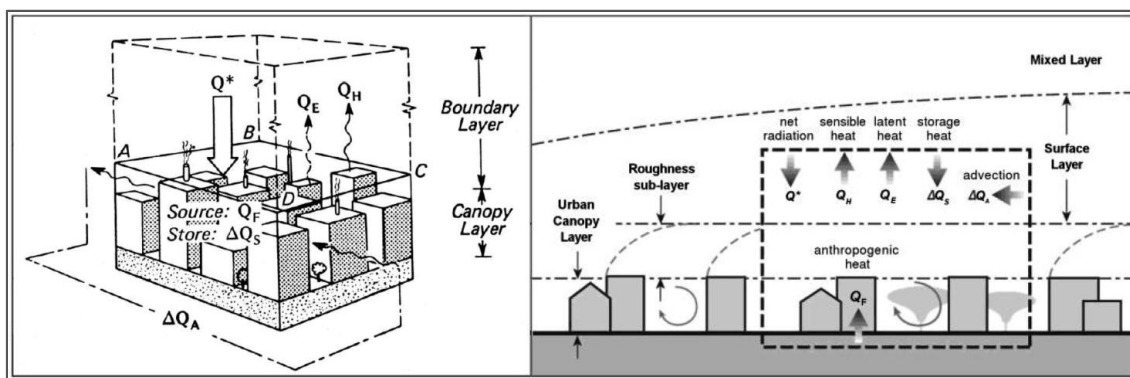


Figura 12 - Rappresentazione schematica del volume di controllo considerato per la realizzazione del bilancio energetico (Oke, 1987; Erell et al., 2011).

Esiste un ultimo termine da tenere in conto nella valutazione del bilancio di calore relativo, però, non ad una superficie ma a un volume di controllo, definito *avvezione netta* ΔQ_A attraverso le superfici laterali del suddetto volume di controllo. In meteorologia con il termine *avvezione* ci si riferisce allo spostamento orizzontale di una massa d'aria con differenti caratteristiche di temperatura e umidità; nel bilancio di calore di un volume di controllo, ΔQ_A risulta trascurabile se si considera un'area urbana centrale caratterizzata da una densità uniforme di edifici, mentre assume valore significativo nelle zone di confine con le aree rurali (Santamouris, 2001) (Figura 12).

Nelle aree urbane, inoltre, sono rilevabili maggiori concentrazioni nell'aria di aerosol, pulviscolo atmosferico composto in prevalenza da inquinanti atmosferici di origine antropica, che riducono la radiazione solare entrante e, al contempo, determinano un aumento della radiazione infrarossa entrante.

L'illustrazione delle differenze sostanziali del comportamento radiativo di superfici naturali e urbanizzate risulta propedeutica per la comprensione delle cause dell'*isola di calore urbana* – il più importante e studiato fenomeno di alterazione del clima da parte delle città – e delle misure da mettere in essere per contrastarla.

CAPITOLO 5 - L'isola di calore urbana

Cenni storici

Gli studi sul clima urbano, sin dal principio, hanno evidenziato come la forma delle grandi aree metropolitane contemporanee e le attività che in esse hanno luogo, determinino un aumento complessivo della temperatura media annua e una sostanziale modifica di altri parametri meteorologici.

Tale fenomeno è riconducibile all'elevato accumulo di calore dei manti stradali e delle superfici verticali degli edifici, dal calore generato dalle attività urbane e dalla cronica assenza di elementi di termoregolazione come spazi verdi e aree umide. Il fenomeno in questione, denominato isola di calore urbana, o *Urban Heat Island* (UHI), si manifesta con un lento rilascio di calore (immagazzinato o generato) verso l'ambiente esterno e conduce ad un significativo aumento della temperatura in area urbana.

Il primo a descrivere lo sviluppo del fenomeno dell'UHI durante il corso di un anno e a ipotizzarne le cause fu il meteorologo inglese Luke Howard nel suo monumentale studio *The Climate of London*, pubblicato nel 1833. Howard effettuò dal 1806 al 1830 misurazioni giornaliere di pressione, temperatura, umidità, precipitazioni atmosferiche all'esterno della città di Londra e collezionò articoli di giornale riguardanti qualsiasi evento meteorologico degno di nota.

Howard identificò l'UHI come la differenza tra temperatura dell'aria rilevata in città e quella rilevata nelle campagne ed ipotizzò che tale differenza dovesse incrementare andando dai limiti della città al centro urbano. In tale studio, inoltre, Howard dimostrò che l'UHI consisteva in un fenomeno soprattutto notturno e la cui intensità risultava maggiore nei mesi invernali.

Il nome *isola di calore* compare in letteratura per la prima volta nel 1958 in un articolo di Gordon Manley nel *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*, sebbene è plausibile che sia stato coniato prima (Erell et al., 2011).

Studi sistematici del fenomeno dell'UHI, tuttavia, non cominciarono prima della fine degli anni '40 del Novecento, quando i ricercatori iniziarono ad indagare le variazioni locali nelle proprietà dell'atmosfera.

Nel 1966 un'intensissima ondata di calore manifestatasi a New York City produsse un aumento della mortalità del 6%. Questo e altri eventi drammatici solleccitarono una serie di studi sull'UHI basati sull'impiego di metodi statistici per testare le ipotesi e su un approccio al fenomeno fondato sul bilancio di energia. Dagli anni '70, con la diffusione dei primi calcolatori elettronici, cominciarono a svilupparsi tecniche di modellazione e simulazione, testate poi, a partire dagli anni '80, su forme urbane standardizzate. Dagli anni '90 in poi, infine, la ricerca in materia di UHI ha lentamente abbandonato l'investigazione delle cause e ha tentato di stabilire relazioni tra forme, materiali, funzioni urbane e gli effetti delle stesse sul clima e di migliorare i modelli descrittivi della geometria urbana (Mills, 2009).

L'UHI, dal punto di vista scientifico, esercita ancora oggi un fascino notevole in ragione della stretta relazione con questioni di grande attualità come la ricerca di risposte ai cambiamenti climatici e le strategie da adottare per una pianificazione sostenibile.

Definizione

Il termine *isola di calore urbana* è utilizzato per descrivere l'anomalia termica che si verifica nelle aree urbanizzate per cui la temperatura della città risulta maggiore di quella delle aree rurali circostanti.

L'intensità dell'UHI è convenzionalmente espressa come differenza ΔT_{U-R} tra due misurazioni di temperatura, una indicativa delle condizioni 'urbane' T_U e l'altra delle condizioni 'rurali' T_R .

Alcuni autori hanno sollevato la questione della difficoltà di selezionare, nella pratica, una coppia appropriata di stazioni di misurazione urbano-rurale, che sia soggetta alle stesse condizioni meso-climatiche (Erell et al., 2011). La stessa dicotomia urbano-rurale rappresenta l'idealizzazione di una condizione non più appartenente alla città moderna, ovvero la presenza di confini delle aree urbane ben definiti che consentano di distinguere chiaramente la città dal suo intorno rurale.

Pertanto, il punto di misurazione della temperatura indicativo della condizione 'rurale' è spesso semplicemente ubicato ad una distanza considerevole dal

centro città con il rischio che lo stesso sia sottoposto a condizioni meso-climatiche differenti e che, pertanto, il confronto tra la coppia di temperature non restituisca la reale intensità del fenomeno.

Tipologie

Occorre distinguere tre tipi diversi di UHI, classificabili a seconda di quali siano le temperature misurate nell'area urbana e nelle aree rurali circostanti, e che differiscono tra loro per comportamento temporale, forma e grado di omogeneità:

- a) UHI *superficiale* (SUHI), quando è misurata la differenza tra la temperatura delle superfici urbanizzate e la temperatura delle superfici rurali circostanti. Tale tipo di UHI si verifica quando la città è circondata da terreni umidi o da aree vegetate che sono tendenzialmente più fredde delle superfici opache urbane; terreni circostanti rocciosi o sabbiosi potrebbero infatti risultare più caldi delle superfici urbane. Le SUHI presentano grandi intensità durante il giorno, in particolare in condizioni di cielo sereno e di vento debole, mentre sono meno intense nel corso della notte;
- b) UHI dell'*Urban Canopy Layer* (CLUHI), quando ad essere rilevata è la temperatura dello strato di aria più prossimo alla superficie, avente estensione approssimativamente pari all'altezza media degli edifici. La CLUHI è tipicamente osservabile in orari notturni in condizioni di stabilità atmosferica e con leggera nuvolosità e venti deboli, mentre è di esigua intensità durante il giorno (**Figura 13**);
- c) UHI dell'*Urban Boundary Layer* (BLUHI), quando è misurata la temperatura dello strato di aria al di sopra dell'altezza media degli edifici; comporta la formazione di una 'cupola' di aria calda dello spessore di circa un kilometro durante il giorno che si riduce ad alcune centinaia di metri durante la notte. Il vento può cambiare la forma della CLUHI da 'cupola' a 'pennacchio'.

La UHI superficiale si misura con tecniche di *telerilevamento* ovvero mediante l'acquisizione e il processamento di immagini da satellite o aeree nei canali dell'infrarosso. A seconda della quota e dell'inclinazione, tale modalità di rilievo include il contributo di tetti, strade, parcheggi (con sensori radiometrici posti a

quote sufficientemente elevate) o anche delle pareti degli edifici (con sensori a quote più basse). La UHI dell'*Urban Boundary Layer* e dell'*Urban Canopy Layer*, invece, sono misurate utilizzando dei tradizionali termometri in postazione fissa (torri, palloni sonda e in prossimità del suolo) o in postazione mobile (su aerei e automobili). È possibile effettuare la misurazione dell'UHI dell'*Urban Boundary Layer* indirettamente ovvero impiegando, ad esempio, un Sodar, strumento meteorologico capace di rilevare la diffusione delle onde sonore riflesse dalle turbolenze atmosferiche ed impiegato per misurare il profilo di temperatura verticale a varie altezze sopra il livello del suolo, tramite, appunto l'utilizzo di onde sonore.

Si fa presente come assuma importanza significativa la posizione delle stazioni in una campagna di misurazioni effettuate nell'*Urban Canopy Layer*. Un campionamento tramite autovettura, ad esempio, fornirà una rappresentazione della situazione limitata alle temperature dell'aria al di sopra della sola superficie stradale. Posizionando, invece, le stazioni in maniera omogenea nell'area cittadina si riesce ad ottenere una maggiore quantità di informazioni per l'analisi del fenomeno.

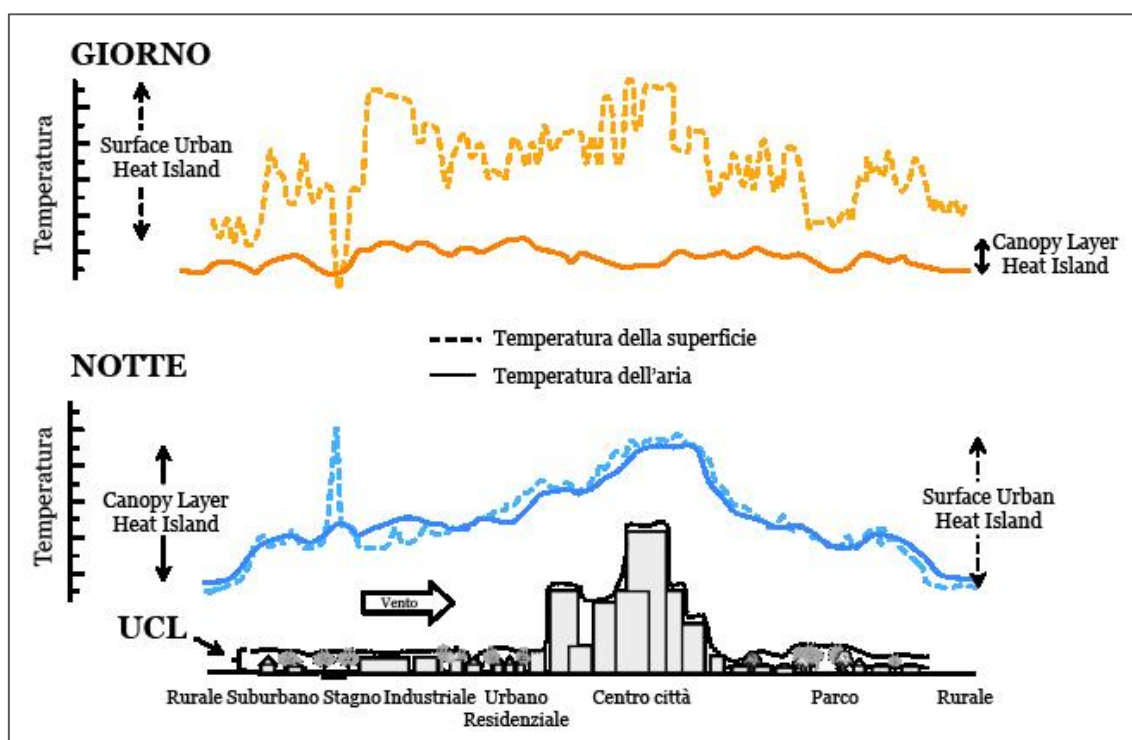


Figura 13 - Andamento diurno e notturno della temperatura superficiale ed atmosferica (elaborazione su Voogt, 2004).

Diversamente dall'isola di calore atmosferica, la misurazione dell'UHI superficiale avviene tramite il metodo indiretto del *telerilevamento*, utilizzando cioè dei sensori in grado di interagire a distanza con le superfici di interesse e di rilevarne la radiazione infrarossa emessa. Il risultato di un rilievo condotto con tecniche di rilevamento è costituito da un'immagine, detta *termografia*, in cui ad ogni *pixel* è associato un valore di temperatura. A causa della complessità della superficie reale urbana si considera spesso una superficie semplificata, che approssima quella effettiva. La superficie studiata è funzione del posizionamento dei sensori, poiché i rilevamenti effettuati da piattaforme satellitari, o eseguiti al livello del suolo consentono di 'vedere' superfici differenti. Quando le misurazioni sono effettuate da satellite, infatti, la risoluzione dell'immagine è tipicamente inferiore rispetto ad un rilievo effettuato con un sensore aviotrasportato che consente di riconoscere le immagini rivelando l'alterazione delle città rispetto alle zone circostanti⁹ (Figura 14). Le valutazioni contenute nel prosieguo della trattazioni riguarderanno, anche quando non specificato, l'isola di calore dell'*Urban Canopy Layer*.

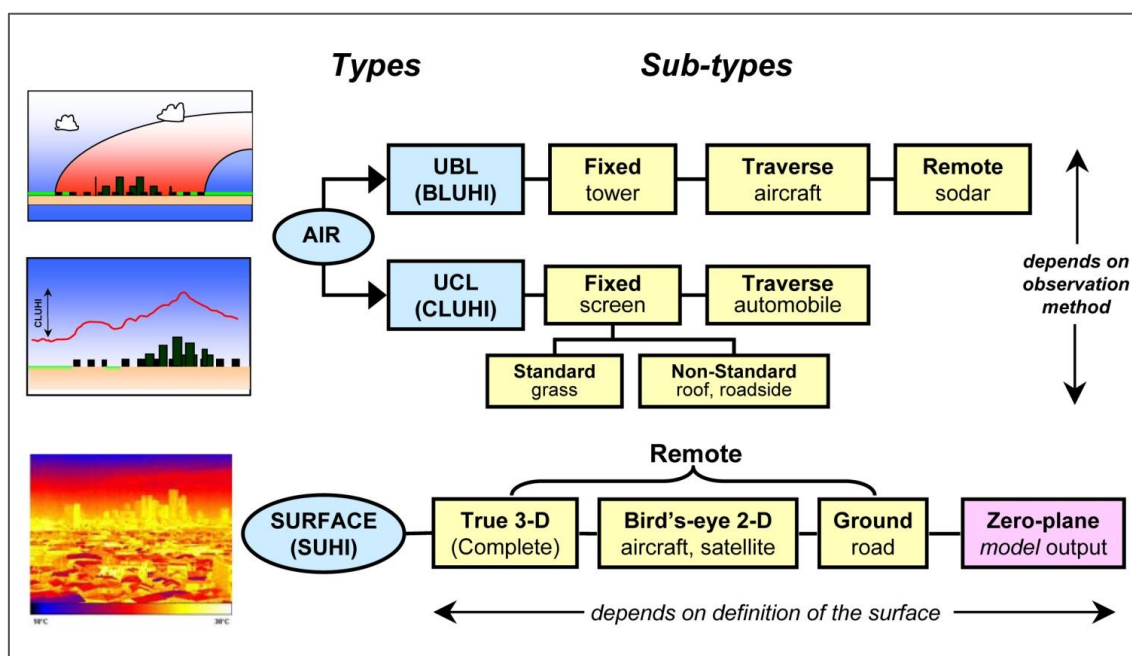


Figura 14 - Modalità di rilevamento delle varie tipologie di UHI (Voogt, 2006).

⁹ Si consideri che i due sensori Landsat (progetto della NASA per l'acquisizione di immagini telerilevate della Terra) attualmente in orbita presentano una risoluzione per la banda dell'infrarosso termico di 60 m (Landsat 7) e 100 m (Landsat 8), mentre sensori aviotrasportati restituiscono termografie con risoluzioni fino a frazioni di metro.

Cause ed effetti

Le cause del fenomeno dell'UHI sono facilmente evincibili dall'analisi delle differenze nei termini che compongono il bilancio di calore e radiativo della superficie di un'area urbanizzata e di quella di un'area ad essa circostante. È, infatti, il bilancio di energia che determina il verificarsi di un processo di riscaldamento o di raffreddamento della superficie.

Al mattino, nelle aree urbanizzate si verifica una prevalenza del flusso di calore sensibile sul flusso di calore latente ($Q_H > Q_E$). Ciò avviene poiché le superfici urbane sono prevalentemente opache e presentano un bassissimo contenuto d'acqua. Il fenomeno è maggiormente sentito in tessuti urbani con limitata presenza di suoli naturali e aree vegetate (parchi, aiuole) o di corpi idrici (fiumi, torrenti, laghetti). La superficie, dunque, sfrutta il calore sensibile come canale preferenziale per trasferire calore all'aria sovrastante la quale aumenta la temperatura e, di conseguenza, riscalda la struttura urbana.

Nel pomeriggio, per i motivi citati in precedenza, il flusso di calore sensibile cala più gradualmente rispetto alle aree rurali.

Dal tramonto in poi, la struttura urbana rilascia una quantità significativa di calore, immagazzinato durante la giornata.

In ultimo, il flusso di calore antropogenico costituisce una sorgente aggiuntiva di energia che, sebbene non sia ascrivibile tra le principali cause dell'UHI, può comunque rappresentare una quota non trascurabile del bilancio, in particolar modo in inverno (alto consumo di energia per il riscaldamento degli edifici), con venti deboli e in condizioni di stabilità atmosferica.

Attualmente, si stima, per una città di medie dimensioni, che il fenomeno dell'UHI provochi una differenza di temperatura tra il centro e le zone rurali compresa tra 0,5 °C e 3 °C. Inoltre, dall'esame di dati stagionali, è stato rilevato che la temperatura media invernale minima è superiore rispetto ad una condizione ordinaria (senza UHI) di 1-2 °C e che le temperature massime estive sono superiori a 1-3 °C. La temperatura non è l'unico parametro che l'UHI tende a modificare. Si stima che i temporali siano del 10-15% maggiori rispetto alle aree rurali a causa della maggiore quantità di calore disponibile nei moti convettivi.

Oltre all'aumento della temperatura atmosferica l'UHI ha anche effetti sui venti locali. In condizioni di ventilazione debole, infatti, si possono sviluppare sistemi di circolazione analoghi alle brezze di mare. L'aria più calda sovrastante le aree più densamente urbanizzate si muove verso l'alto, richiamando aria dalle aree suburbane e rurali circostanti verso il centro della città. Tale fenomeno, se da un lato potrebbe richiamare dalla campagna aria più pulita, dall'altro potrebbe far convergere verso il centro l'aria inquinata di aree industriali o arterie stradali periferiche.

Altro evento nocivo è l'aumento della concentrazione nell'aria delle aree urbane di nuclei di condensazione, minuscole particelle derivanti dall'immissione in atmosfera dei gas di scarico delle attività antropiche (traffico, processi industriali, processi di combustione). Essi favoriscono la condensazione del vapore nelle nuvole e l'aggregazione progressiva di minuscole particelle d'acqua, fino alla formazione di gocce di pioggia. Più condensazione conduce ad una maggiore copertura nuvolosa e, di conseguenza, maggiori precipitazioni; l'aumento di questi due parametri è rispettivamente del 5-10 % e del 10-15 % per anno (Ministero della Salute, 2009).

L'incremento di temperatura dell'aria ha, inoltre, un impatto preoccupante sul *discomfort* termico percepito dagli utenti della città.

L'Agenzia per la Protezione Ambientale degli USA (EPA) ha riscontrato un rapporto diretto tra i picchi di intensità dell'UHI e malattie e numero di decessi legati al caldo, a causa dell'incidenza di disagio termico sul sistema cardiovascolare e respiratorio umano. Infarti, colpi di calore, svenimenti sono alcuni dei principali eventi dovuti allo stress termico, mentre un gran numero di malattie potrebbe peggiorare, in particolare negli anziani e bambini (US EPA, 2015).

Tralasciando l'aspetto legato al carico antropogenico, è significativo osservare come la morfologia urbana assuma un ruolo determinante nella creazione dell'UHI la cui intensità varia al variare della geometria urbana, delle proprietà dei materiali utilizzati nell'edilizia e della presenza di spazi verdi.

Geometria urbana

Ciò che distingue un'area urbana da un'area rurale è la concentrazione di attività residenziali, produttive e di svago svolte prevalentemente in edifici i quali sono disposti con densità variabile all'interno dello spazio costruito, solitamente crescente dalle aree periferiche andando verso il centro città.

La presenza di una densa matrice di edifici promuove la creazione dell'UHI attraverso un fenomeno di interazione tra la geometria dello spazio urbano e la radiazione incidente.

Le alte cortine edilizie che si fronteggiano lungo le arterie viarie configurano, infatti, spazi simili a *canyon* che, soprattutto in contesti densamente edificati, sono spesso più profondi di quanto non siano larghi.

La geometria del *canyon urbano* modifica il bilancio energetico rispetto a quanto avviene nel caso di una superficie piana. La radiazione solare, infatti, non essendo il raggio di incidenza mai perpendicolare al suolo, se non a mezzogiorno, è riflessa più volte dal manto stradale e dalle pareti degli edifici. Tali riflessioni implicano che dette superfici assorbano una maggiore quantità di calore, successivamente ceduto all'atmosfera.

Il canyon urbano, inoltre, determina la permanenza di aria calda al suo interno anche durante le ore notturne. Il raffreddamento dell'aria che ristagna entro i *canyon*, infatti, avviene molto più lentamente di quanto non succeda all'aria che sovrasta le aree rurali, in quanto l'energia infrarossa irraggiata nel canyon dalle superfici che lo delimitano, anziché disperdersi liberamente verso l'alto, viene per la maggior parte catturata e riflessa numerose volte dagli edifici che si fronteggiano ai lati opposti della strada (Figura 15).

I parametri del *canyon urbano* che determinano una maggiore influenza nella variazione della temperatura sono:

- l'orientamento rispetto ai punti cardinali;
- il rapporto tra l'altezza degli edifici H e la larghezza della strada che li divide W ;
- il fattore di vista del cielo o *sky-view factor* (SVF).

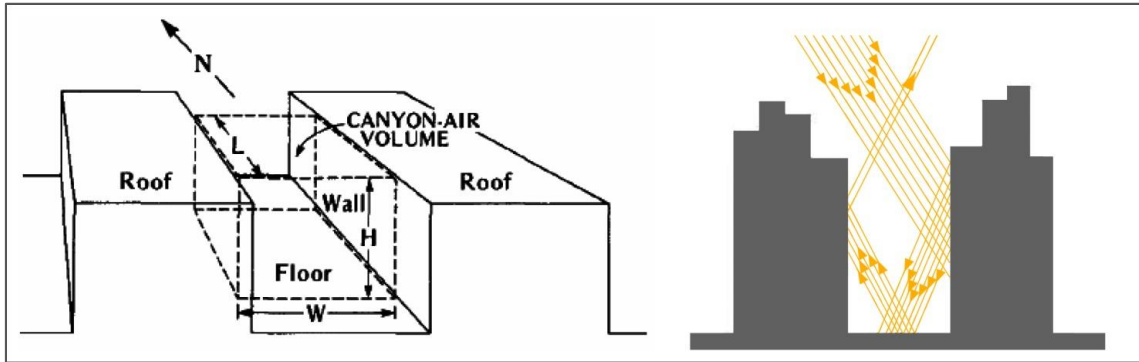


Figura 15 - Rappresentazione schematica di un *canyon urbano* e delle riflessioni e degli assorbimenti multipli che si verificano al suo interno (elaborazione su Nunez e Oke, 1977).

Il rapporto H/W , anche detto *Aspect Ratio*, è una misura della conformazione geometrica del *canyon*. Al crescere di tale rapporto diminuirà la porzione di cielo visibile dall'interno del canyon. Tale parametro, tuttavia, è inadatto per descrivere efficacemente l'estrema eterogeneità dei contesti spaziali presenti in città (edifici con altezze differenti su fronti stradali opposti o sul medesimo fronte). Una misura alternativa per esprimere la frazione di cielo visibile e quantificare, in tal modo, l'influenza della geometria sugli scambi radiativi è lo SVF (ψ_{sky}), definito come il rapporto, compreso tra 0 e 1, tra la radiazione ricevuta (o emessa) da una superficie planare e la radiazione emessa (o ricevuta) dall'intero ambiente emisferico (Chen et al., 2010). Lo SVF è quindi una caratteristica di uno specifico punto nello spazio ed esprime l'entità dello scambio radiativo con il cielo (Unger, 2009). Considerando un punto della superficie urbana, la radiazione da esso proveniente in parte raggiunge il cielo e in parte viene assorbita dalle superfici circostanti (edifici, alberi, etc.) (Figura 16). Sulle modalità di calcolo dello SVF si tratterà approfonditamente nel Capitolo 7. La riduzione dello SVF nei *canyon urbani* è considerata una delle principali cause delle UHI dell'*Urvan Canopy Layer*, poiché comporta una diminuzione delle perdite radiative notturne in condizioni di vento debole e cielo sereno. Si ricorda come già nel 1981 Oke propose una relazione di dipendenza tra la massima intensità dell'UHI $\Delta T_{(U-R)MAX}$ e la geometria urbana, espressa sia in termini di rapporto H/W che di SVF (Oke, 1981a):

$$\Delta T_{(U-R)MAX} = 7,45 + 3,97 \ln\left(\frac{H}{W}\right) = 15,27 - 13,88 \psi_{sky}$$

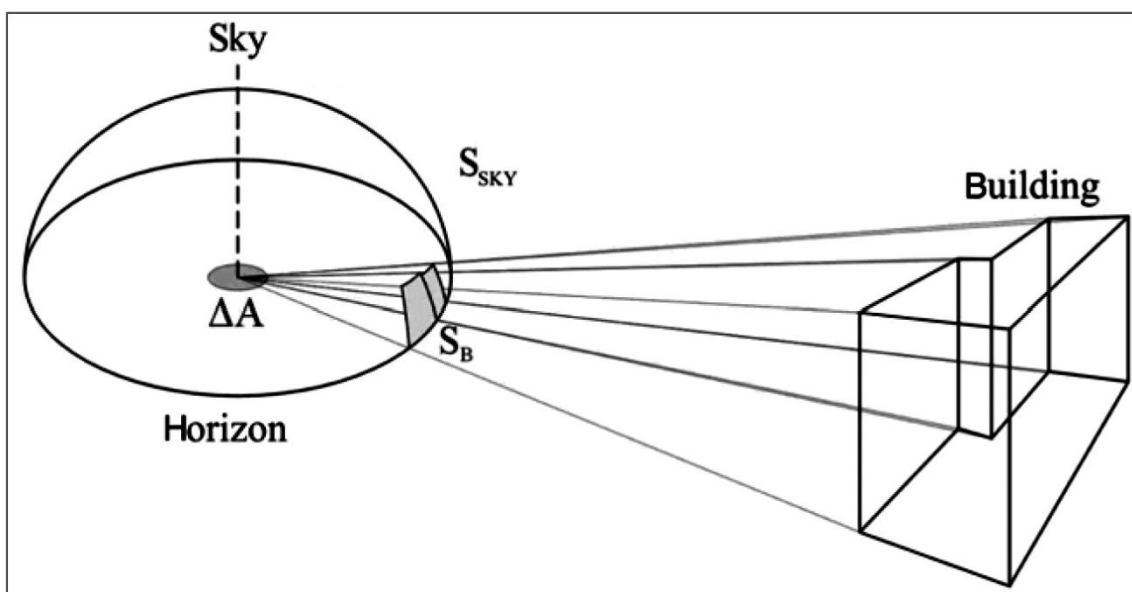


Figura 16 - Rappresentazione schematica dello SVF (Unger, 2009).

Mentre la geometria del *canyon*, così come descritta dallo SVF, risulta avere grande effetto sul bilancio radiativo in città, il suo contributo alla UHI rimane una questione complessa (Errel et al., 2011). Ad esempio, alte correlazioni sono solitamente individuate tra le temperature superficiali e lo SVF ma le correlazioni con la temperatura dell'aria dei medesimi contesti urbani potrebbe essere notevolmente inferiore.

In ultimo, è bene far notare come una densa geometria urbana riduca la velocità del vento in prossimità del suolo e limiti i flussi d'aria all'interno dell'*Urban Canopy Layer*, impoverendo la capacità della ventilazione di mitigare le alte temperature. A tal riguardo, si sottolinea l'importanza dell'orientamento delle strade nella dinamica del fenomeno dell'UHI, soprattutto in relazione alla direzione solare e del vento (Esch et al., 2007). Come ricordato, infatti, il vento ha la funzione di eliminare grandi variazioni di temperatura e, pertanto, di ridurre la presenza di *hot spot* (Taleb et al., 2012). Studi hanno sottolineato come le reti stradali con *canyon urbani* paralleli al flusso del vento prevalente contribuiscano ad aumentare la velocità del vento e la dissipazione del calore immagazzinato, e, pertanto, concorrano alla riduzione dell'effetto UHI (Radhi et al., 2013).

Spazi verdi

L'effetto UHI è anche incrementato dalla scarsa estensione delle superfici verdi all'interno delle aree urbane, come, prati, zone alberate, aiuole, etc.

Sono molteplici, infatti, i contributi benefici assicurati dalla presenza di vegetazione all'attenuazione del flusso di energia dal suolo all'atmosfera sovrastante. Le chiome degli alberi, infatti, creando delle zone d'ombra, schermano il passaggio della radiazione solare. La vegetazione, inoltre, contribuisce ad attenuare il riscaldamento dell'aria da parte delle superfici attraverso i processi evotraspirativi.

Con il termine *evapotraspirazione* si indica l'azione di due processi simultanei, l'evaporazione e la traspirazione vegetale. Il primo processo, di cui si sono già chiariti i principi fisici in precedenza, esprime il passaggio allo stato gassoso dell'acqua presente su di una superficie, il secondo, invece, si riferisce al trasferimento nell'atmosfera, attraverso gli stomi fogliari, dell'acqua precedentemente assorbita dalle radici.

L'evaporazione da terreno umido o bagnato e da parte delle foglie della vegetazione, sottrae enormi quantità di calore all'aria (circa 600 calorie per ogni grammo di acqua che evapora).

Chiaramente, meno aria evapora dalle aree urbane meno aria al di sopra di esse sarà raffreddata.

I suoli urbanizzati, come già ricordato, presentano un contenuto d'acqua molto basso, pertanto, lo scambio di energia con l'aria avviene prevalentemente attraverso il flusso di calore sensibile (alto Rapporto di Bowen β) che determina un incremento di temperatura dell'aria molto più intenso rispetto a quanto non avvenga nel bilancio di una superficie naturale.

Per completezza, è bene ricordare che il valore di β risulta sensibilmente influenzato dalle precipitazioni atmosferiche. L'impermeabilità dei suoli urbani fa sì che le acque meteoriche dilavino senza infiltrarsi nel terreno come invece avviene nel caso di suoli naturali i quali assorbono gran parte dell'acqua di pioggia. Trascorsi alcuni giorni da una precipitazione meteorica, dunque, lo scarso contenuto d'acqua delle superfici urbane determinerà bassi valori di umidità dell'aria.

Numerosi studi sono stati condotti con l'obiettivo di verificare l'effetto di mitigazione dell'UHI attraverso l'aumento della superficie di aree vegetate all'interno dell'ambito urbano, rilevando come il verde urbano possa contenerne la temperatura superficiale entro i 20 °C e come l'ombreggiamento garantito dagli alberi possa, altresì ridurre globalmente la temperatura dell'aria di 5-7 °C, migliorando il comfort microclimatico.

Altro aspetto non trascurabile, che sarà oggetto di approfondimenti specifici nel prosieguo del presente lavoro, è la configurazione spaziale delle aree verdi all'interno del tessuto urbano.

Alcuni studi hanno dimostrato che localizzazioni diffuse del verde in aree urbane determinano una più accentuata riduzione della temperatura superficiale di un ambito rispetto a grandi superfici concentrate (Junxiang Li et al., 2011).

Altre recenti ricerche hanno cercato di simulare le relazioni tra SVF e configurazione delle alberature, rilevando significative riduzioni della temperatura superficiale serale di ambiti urbani con SVF medio-basso, con particolare riferimento ad alberature parallele alla direzione dei venti prevalenti (Tan et al., 2015).

Proprietà dei materiali urbani

Gli studi sui materiali utilizzati nelle aree urbane hanno evidenziato come le caratteristiche fisiche di questi ultimi – lastrici solari o strade asfaltate che sotto l'effetto della radiazione solare estiva possono raggiungere i 65° C – siano fattori che mutano il bilancio energetico dell'ambiente urbano.

L'intensità dell'UHI si riduce in maniera rilevante se materiali con alto coefficiente di assorbimento della radiazione solare, come asfalto o tegole di colore scuro, sono sostituiti con materiali per pavimentazioni e coperture degli edifici aventi albedo più elevata.

La conversione a livello urbano dei tetti neri in tetti bianchi o verdi¹⁰ può avere effetti positivi non solo su micro-scala, ma anche alla scala urbana. Infatti,

¹⁰ Con il termine *tetto nero* si indica la copertura piana di un edificio in cui lo strato più esterno è costituito da una guaina bituminosa. Il *tetto bianco* o *freddo* (*cool roof*), invece, prevede la pitturazione dello strato esterno della copertura con vernici con elevata albedo, capaci cioè di

riducendosi l'uso di energia per il raffreddamento degli edifici diminuisce considerevolmente anche il carico antropogenico Q_F . La conversione a livello urbano di tetti neri in tetti verdi è in grado di garantire una migliore gestione delle acque piovane, un miglioramento della qualità dell'aria e un aumento della biodiversità urbana (Susca et al., 2013). Tuttavia molti fattori devono essere considerati in una valutazione globale dell'impiego di tetti freddi e tetti verdi. Le loro specifiche *performace*, l'invecchiamento dei materiali impiegati per la realizzazione di tetti freddi, le esigenze di irrigazione dei tetti verdi, così come le diversità climatiche, dovrebbero essere contemporaneamente prese in considerazione per massimizzare le prospettive di mitigazione (Kolokotsa et al., 2013). Anche gli studi più recenti non sono stati in grado di tenere in considerazione tutti i fattori, tra cui temperatura, umidità, velocità del vento, inquinamento atmosferico, per effettuare una compiuta analisi di idoneità dei tetti verdi e dei tetti freddi. È praticamente impossibile includere analisi così dettagliate all'interno di un solo studio a causa di tempi e costi associati ad un esame approfondito di tutti gli edifici in un quartiere (Kwok Wai Wong, Siu-Kit Lau, 2013).

Principali strategie di mitigazione dell'isola di calore urbana

L'attenuazione dell'intensità dell'UHI può essere perseguita mettendo in essere azioni di mitigazione tese a modificare i termini del bilancio energetico superficiale.

Tali azioni dovranno tendere alla riduzione di:

- 1) flusso di calore immagazzinato nella struttura urbana ΔQ_S , intervenendo sulla geometria urbana e sull'uso di materiali a minore ammettenza termica (ad esempio, miglioramento delle *performance* di coibentazione degli edifici);
- 2) Rapporto di Bowen β , ovvero trasformando parte del flusso di calore sensibile Q_H in flusso di calore latente Q_E , aumentando la percentuale di aree permeabili e vegetate all'interno dell'area urbana;

riflettere le radiazioni provenienti dalla luce solare fino al 75-80%, mantenendo in questo modo fresche le superfici esposte al sole. Il *tetto verde*, infine, è un tipo di copertura composto da un 'pacchetto' di più strati che prevede un ultimo strato parzialmente o completamente ricoperto di vegetazione.

- 3) radiazione netta Q_s^* , modificando la geometria urbana e incrementando l'albedo delle superfici coinvolte nello scambio di calore.
- 4) flusso di calore antropogenico Q_F , intervenendo su consumi di energia elettrica, traffico veicolare, riscaldamento domestico.

È facile notare come alcune delle strategie sopracitate siano perseguibili con la stessa tipologia di azione in quanto agenti contemporaneamente su più termini del bilancio di energia della superficie (Figura 17).

È altrettanto evidente, tuttavia, come non tutte le suddette azioni siano concretamente realizzabili in tessuti urbani consolidati, come ad esempio l'aumento dello SVF attraverso la modifica della geometria urbana, strategia, questa, certamente da mettere in atto in caso di realizzazione di nuovi insediamenti.

Nella pianificazione degli interventi da attuare per la riduzione dell'UHI è necessario considerare che ogni isola di calore ha caratteristiche proprie ed è determinata da molteplici concause che determinano effetti differenti a seconda dei contesti specifici. Non esiste quindi una 'ricetta' universale per la mitigazione dell'effetto UHI e alcune azioni si potrebbero rivelare inefficaci o addirittura controproducenti se applicate senza aver considerato le specificità locali (Bonafè, 2006).

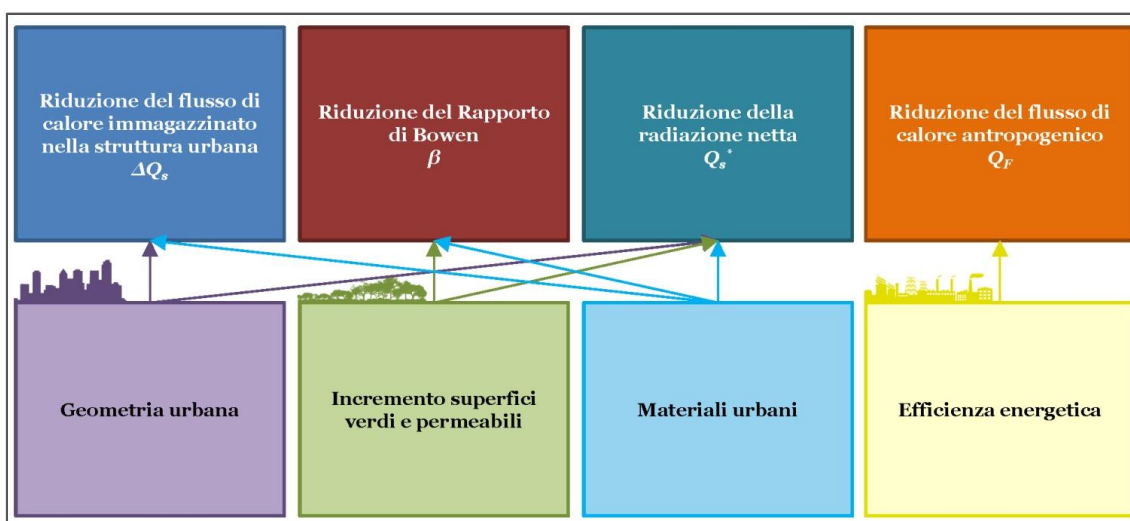


Figura 17 - Principali strategie di mitigazione dell'UHI e relativa influenza sui termini del bilancio di energia della superficie.

Incidenza dell'isola di calore urbana sul *climate change*

I risultati di uno studio proposto da McKittrick e Michaels nel 2007 denunciavano che metà dell'incremento di temperature globale dal 1980 al 2002 sarebbero stati causati dal fenomeno dell'isola di calore urbana (McKittrick, Michaels, 2007).

Solo un anno dopo Jones, Hilster e Li smentivano quanto sopra, pubblicando uno studio sugli effetti dell'urbanizzazione sull'aumento di temperatura a larga scala e dimostrando come sebbene nelle città oggetto di studio fosse stato registrato un eccesso di calore, i trend rilevati per il centro città e per le aree rurali circostanti dal 1961 al 1990 fossero sostanzialmente simili (Jones et al., 2008).

Certamente le isole di calore, essendo un fenomeno a scala locale e interessando sono una parte risibile della superficie terrestre, non risultano determinanti per il riscaldamento globale (Voogt, 2004). Esistono, tuttavia alcune connessioni tra la scala globale e quella locale degne di nota.

È già stato detto dell'eccezionale contributo dato dalle città nell'emissione dei GHG e di come quota preponderante sia dovuta all'approvvigionamento di energia per il funzionamento degli edifici e dei sistemi di riscaldamento e condizionamento dell'aria. Città sempre più calde a causa del fenomeno UHI determinano un incremento nell'uso dei condizionatori d'aria che scaricano il calore presente negli ambienti interni nell'atmosfera cittadina. Ciò origina un circolo vizioso. L'aria esterna sarà più calda e l'aria condizionata sarà sempre più domandata. Una ricerca effettuata per l'area urbana di Phoenix, ha stimato un aumento della temperatura dell'aria notturna di più di 1 °C, dovuto all'uso dei sistemi di condizionamento.

Prospettive future in tema di isola di calore urbana

Oke, circa 10 anni fa, descrisse l'evoluzione degli studi in materia di climatologia urbana definendo otto principali campi di indagine: concettualizzazione; teorizzazione; osservazione sul campo; modellazione; valutazione del modello; applicazione nella pianificazione e progettazione urbana; valutazione d'impatto

(post-implementazione); sviluppo di *policy* e successive modifiche. Egli rilevò che, mentre le prime quattro modalità erano progredite in modo significativo negli ultimi decenni, la valutazione di modelli urbani e il trasferimento di conoscenze nella prassi pianificatoria non era stato ancora adeguatamente sviluppato ed approfondito (Oke, 2006).

Il trasferimento diffuso delle conoscenze scientifiche dalla semplice dissertazione teorica ai processi di governo e trasformazione del territorio resta una sfida importante. Uno degli ostacoli è costituito dalla marginale importanza attribuita a tali questioni nei processi decisionali che riguardano la pianificazione urbanistica. Non è da trascurare, tuttavia, il fatto che le suddette conoscenze risultino nella maggior parte dei casi non agilmente comprensibili per decisori e pianificatori. Pertanto, un'ulteriore filone di ricerca è quello che mira a definire strumenti con cui comunicare, attraverso modalità di rappresentazione tipiche della pianificazione urbanistica, le relazioni tra la città e i fenomeni climatici. Gli studi condotti in tal senso a partire dagli anni '70 ma intensificatisi nel corso degli ultimi dieci, hanno consentito di approfondire la comprensione dei legami tra copertura del suolo, topografia, ventilazione e urbanizzazione, conducendo alla definizione di un approccio versatile e flessibile per la mappatura del clima a scala urbana che si è dimostrato adattabile a climi e contesti di pianificazione differenti e che sarà oggetto di trattazione nel Capitolo 6.

PARTE III

Mappa per l'adattamento al cambiamento climatico: strumenti, tecniche e una proposta metodologica



Premessa

Nella presente Sezione è proposta e descritta una metodologia per la redazione di una mappa per l'adattamento ai cambiamenti climatici, basata sulla integrazione delle metodologie in uso per la definizione delle mappe di clima urbano con una procedura di analisi della morfologia dei tessuti urbanizzati, attraverso la quale individuare la suscettibilità degli ambiti urbani alle anomalie termiche, e per i quali definire strategie di intervento, da mettere in essere per il patrimonio edilizio esistente e/o per la realizzazione di nuovi insediamenti.

La Sezione si articola, quindi, in tre capitoli: nel Capitolo 6 sono descritti metodi, tecniche, ed esperienze applicative di redazione di mappe di clima urbano, mettendone in evidenza gli indubbi vantaggi e gli avanzamenti necessari per incrementarne l'efficacia; nel Capitolo 7, invece, sono rappresentati indicatori, parametri e metriche per misurare quegli aspetti della forma della città responsabili dell'alterazione del clima urbano; in ultimo, il Capitolo 8 contiene una formalizzazione del percorso metodologico proposto, la cui applicazione ad un caso studio è oggetto di trattazione nella Parte IV.

CAPITOLO 6 - Le mappe di clima urbano come strumento propedeutico all'adattamento al *climate change*

Introduzione

Il lavoro di ricerca si propone l'approfondimento di un percorso metodologico e operativo di supporto al processo di pianificazione che indaghi le relazioni intercorrenti tra la morfologia dei tessuti insediativi e le caratteristiche del clima urbano a scala territoriale, in aree densamente urbanizzate, e che consenta di formalizzare per gli stessi strategie di intervento sulla morfologia urbana e sulla dotazione di servizi ecosistemici di regolazione, al fine di perseguire l'adattamento della città agli effetti del *climate change*, con particolare riferimento alle anomalie termiche.

La grande variabilità degli impatti climatici potenzialmente suscettibili di interessare gli insediamenti urbani e la conseguente complessità delle azioni necessarie per l'adattamento, hanno fatto sì che, nell'ambito della letteratura scientifica e delle esperienze operative finora implementate, fossero proposti numerosi approcci metodologici tesi a guidare i percorsi che conducono a un Piano di adattamento locale. Tra i più recenti si segnalano il *Planning for adaptation to climate change. Guidelines for municipalities* (Giordano et al., 2013), nonché le *Guidelines on developing adaptation strategies* (EC, 2013), incluse nella *Strategia Europea di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* e che si basano sul cosiddetto *Adaptation support tool* della piattaforma europea, raccomandando agli Stati Membri, definito da una sequenza di sei passi (Figura 18):

- 1) porre le basi per l'adattamento attraverso la creazione di una serie di assetti istituzionali e attività organizzative;
- 2) valutare i rischi e le vulnerabilità al *climate change*;
- 3) identificare le opzioni di adattamento;
- 4) selezionare le opzioni di adattamento, stabilendone le priorità e organizzandole in una strategia;
- 5) attuare la strategia, operazione che implica lo sviluppo di un piano di azione con l'assegnazione dei ruoli e delle responsabilità, assicurando le risorse umane e finanziarie nel lungo termine;

6) monitorare e valutare la strategia.

Come si è già accennato in precedenza, i percorsi verso la redazione di un Piano di adattamento non solo sono complessi sotto i profili del coordinamento istituzionale e della decisione politica, ma anche sotto quelli analitico-ricognitivi, comportando alcuni passaggi tecnici che potrebbero presentare alcune difficoltà operative.

Un fondamentale passaggio, preliminare al Piano di adattamento, comporta la conoscenza della tipologia e dell'intensità dei cambiamenti climatici che interesseranno un dato territorio come, ad esempio, un Comune, una Provincia o un'area metropolitana.

Tale operazione pone il problema rilevante del *downscaling* dei modelli climatici, attualmente predisposti per territori molto ampi e quindi non pienamente affidabili nel fornire indicazioni dettagliate in merito a situazioni locali; il *downscaling* rappresenta, tuttavia, un'operazione complessa e costosa, in quanto necessita di competenze scientifiche ad oggi esprimibili soltanto da qualificati enti di ricerca nazionali, gli unici in grado di fornire informazioni climatiche di dettaglio alle amministrazioni locali.

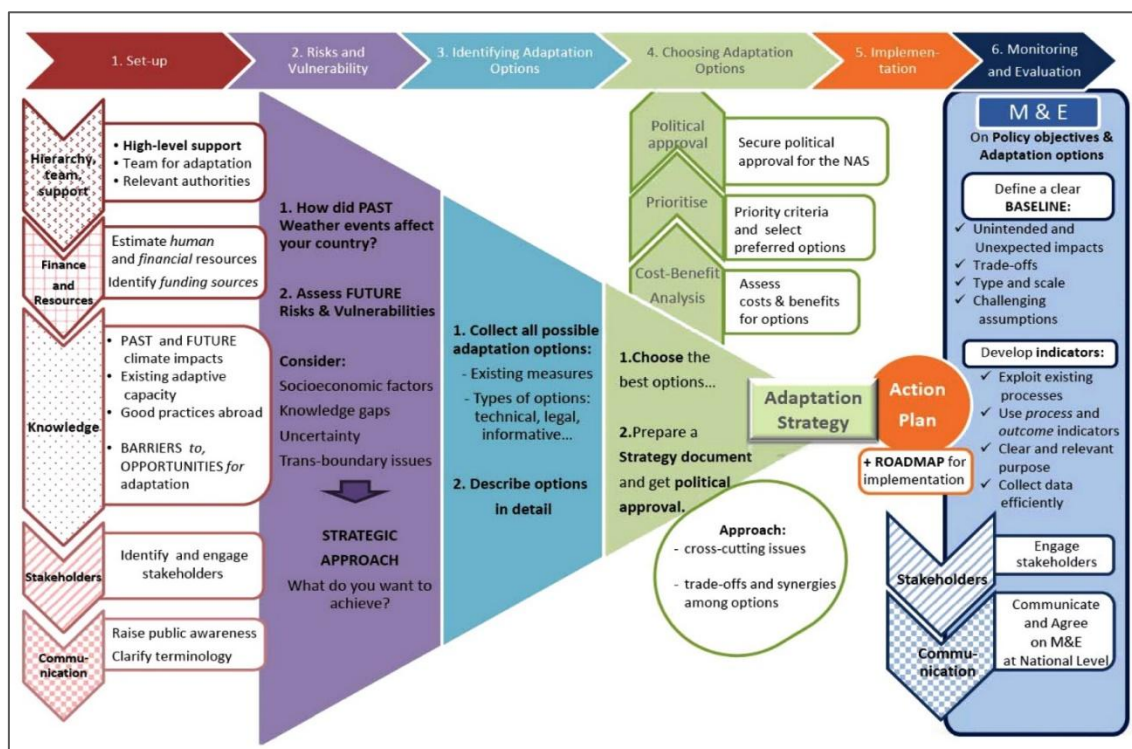


Figura 18 - Sequenza delle fasi per la redazione di un Piano locale di adattamento climatico proposta dalle *Guidelines on developing adaptation strategies* (EC, 2013).

Una seconda operazione tecnicamente complessa è la definizione della vulnerabilità delle differenti parti del territorio oggetto del Piano di adattamento (Filpa, Ombuen, 2013).

A tali criticità si aggiunge un sostanziale scollamento tra i processi di pianificazione urbanistica e territoriale e l'articolato *framework* dell'adattamento al *climate change*.

Esiste, a livello internazionale, un'ampia serie di esperienze e di pratiche, spesso ancora non codificate che, direttamente o indirettamente, incidono sugli effetti del cambiamento climatico (cfr. Capitolo 3).

Esse si concentrano per la maggior parte alla scala urbana e prevedono spesso l'applicazione di nuove tecnologie per il risparmio energetico e idrico e per la difesa del territorio da eventi climatici estremi. Allo stesso tempo, tuttavia, non considerano un complesso di azioni di piano in grado non solo di diminuire la quantità di gas serra emessi, contribuendo così a ridurre gli effetti del surriscaldamento globale, ma anche di rendere le città più resilienti al *climate change*, ovvero aumentarne la sicurezza e ridurre il rischio di incidenti e vittime.

In altre parole, la mera applicazione di innovative soluzioni tecnico-costruttive può vedere i suoi effetti vanificati se la stessa non è preceduta da corrette scelte di piano che hanno come scopo quello di influenzare le scelte localizzative di nuovi insediamenti, ad esempio, riducendo l'utilizzo dell'auto a favore di soluzioni modali a basse/nulle emissioni di gas serra, o di infrastrutture con valenza ecosistemica per la mitigazione degli eventi estremi connessi al cambiamento climatico, ovvero di regolare il complesso delle trasformazioni edilizie ed urbanistiche dei tessuti urbani esistenti attraverso normative *climate-proofing*.

È altrettanto vero, tuttavia, che i modelli di pianificazione urbanistica e territoriale in uso, tanto nelle sperimentazioni di natura accademica, quanto nella prassi professionale, sono raramente ispirati ai principi dell'adattamento al *climate change*, soprattutto per quanto attiene a determinate tipologie di eventi estremi, tra cui i picchi e le ondate di calore. Ciò è attribuibile, senza dubbio, alle difficoltà che i pianificatori incontrano nella comprensione del 'funzionamento climatico' della città.

La conseguenza più evidente di tale difficoltà è che, non considerando all'interno di uno strumento di pianificazione le specificità climatiche del relativo territorio, non si è in grado di prevedere come l'urbanizzazione inciderà sulle stesse. Eventuali conseguenti impatti, inoltre, saranno affrontati con soluzioni a breve termine, senza la consapevolezza di come le scelte di piano li abbiano determinati.

È indubbio, dunque, che per raggiungere l'obiettivo di progettare una città in modo sostenibile e climaticamente consapevole, è necessario comprendere le informazioni climatiche urbane ed applicarle al processo di pianificazione e progettazione urbana (Cleugh et al., 2009).

Si impone, dunque, la necessità di colmare il divario tra climatologia urbana e pianificazione urbanistica trasferendo le conoscenze climatiche nei processi di piano. Tale tentativo è stato messo in essere a partire dagli anni '70, cercando di realizzare piattaforme informative per la comunicazione e la collaborazione tra le due discipline, definite Mappe di Clima Urbano (UC-Map).

Una UC-Map è uno strumento informativo e valutativo capace di rappresentare su mappe spaziali bidimensionali l'interazione tra fattori climatici urbani e caratteristiche del territorio, dalle quali estrarre informazioni utili per la pianificazione urbanistica (Baumüller et al., 1992; VDI, 1997; Scherer et al., 1999).

Ad oggi, sono state predisposte mappe climatiche in più di 20 paesi in tutto il mondo e, recentemente, alcuni interessanti studi sono stati condotti anche in città mediterranee quali Lisbona (Alcoforado, 2009) e Bilbao (Acero, 2013).

Nei paragrafi seguenti saranno tratteggiate l'evoluzione e gli aspetti metodologici di redazione di una UC-Map desunti dalla consultazione della letteratura scientifica internazionale.

Evoluzione delle UC-Map

Nel 1963 il climatologo tedesco Karl Heinrich Knoch propose per primo, nella sua pubblicazione *Die Landesklima-entstehung*, un sistema di mappatura del clima applicato alla pianificazione urbanistica, suggerendo una serie di UC-Map a differenti scale da inserire nel processo di pianificazione locale. A partire dal 1970, la comunità scientifica della Germania Ovest iniziò ad intensificare gli studi sul clima urbano sviluppando mappe climatiche per la pianificazione.

A Stoccarda, sotto la guida scientifica di Baumüller, furono per la prima volta condotti studi per mitigare i problemi di inquinamento dell'aria in condizioni di vento debole ed applicate le conoscenze climatiche alla pianificazione urbanistica e ambientale (Baumüller, Reuter, 1999; Baumüller, 2006).

Nel 1980, con l'obiettivo di controllare il forte inquinamento delle vecchie zone industriali della Ruhr, l'Associazione delle Autorità Locali della Ruhr implementarono un programma di gestione della qualità dell'aria utilizzando delle UC-Map di analisi in cui il territorio di più di 25 città, tra cui Dortmund, Duisburg, Bochum ed Essen, fu classificato in base alle diverse funzioni e caratteristiche. Tale progetto fu il primo a rappresentare le relazioni intercorrenti tra fattori climatici, informazioni spaziali e struttura urbana, definendo, sulla base dell'uso del suolo e delle relative caratteristiche climatiche, vari *climatopi*, ovvero delle unità spaziali che rappresentano condizioni climatiche urbane omogenee (Ren, 2015).

Nello stesso periodo, nello Stato Federale della Baviera, fu pubblicato un progetto di ricerca denominato *Stadtklima Bayern* (Clima urbano dello stato della Baviera) volto ad indagare l'impatto dell'ambiente costruito e delle aree verdi sulla qualità dell'aria e sul microclima urbano delle più importanti città dello Stato (Monaco, Augusta, Norimberga, Fürth, Erlagen), conducendo analisi di termografie, dati meteorologici, rilievi di temperatura allo scopo di esaminare il profilo di temperatura dell'aria delle aree urbane. I disegni venivano eseguiti manualmente e tenevano conto di alcuni *layer*, quali topografia, immagini aeree, termografia, uso del suolo e percorsi dell'aria, i quali, una volta sovrapposti, davano origine ad una UC-Map con una risoluzione di 250 metri (Matzarakis, Mayer, 2008).

Sin dal 1992, la Sezione di Climatologia Urbana dell'Ufficio per la Tutela dell'Ambiente di Stoccarda ha condotto una serie di approfondite analisi climatiche sulla base delle quali sono stati realizzati in ambiente GIS diversi atlanti climatici, tra cui mappe sinottiche, termografie, mappe delle emissioni di gas nocivi e mappe di raccomandazioni per la pianificazione urbanistica (Klimaatlas, 1992).

Negli anni a seguire le UC-Map hanno trovato largo impiego come supporto alla pianificazione di nuovi insediamenti e alla progettazione degli spazi aperti, del

verde urbano; sono, inoltre, state utilizzate per regolare gli scambi di aria nelle aree urbane e controllare l'inquinamento da traffico veicolare, come nel caso della UC-Map redatta nel 1995 nell'ambito del progetto *Berlin Digital Enviromental Atlas*.

In Germania la redazione di UC-Map ha assunto negli anni '90 un'importanza tale da spingere il Comitato Nazionale di Climatologia Urbana Applicata a pubblicare delle linee guida nazionali, VDI 3783, con l'obiettivo di definire la simbologia e le modalità di rappresentazione e suggerire le metodologie da utilizzare per la redazione di UC-Map (VDI, 1997).

Dalla metà degli anni '80 questa visione innovativa della pianificazione territoriale collegata ai fenomeni climatici ha condotto allo sviluppo di numerosi studi e ricerche in tema di UC-Map in Paesi europei come Svizzera, Austria, Svezia, Ungheria, Cecoslovacchia, Polonia, Portogallo e Regno Unito, intensificatisi a seguito delle forti ondate di calore che si sono verificate nel 2003 e nel 2006 nel vecchio continente.

Il Giappone, a partire dagli anni '90, con il supporto di ricercatori tedeschi, è divenuto pioniere dello sviluppo dell'uso delle UC-Map in Asia, grazie ad applicazioni condotte in numerose aree metropolitane come Osaka, Kobe, Yokohama, Sendai, Fukuoka.

Nel 2005, il *Tokyo Metropolitan Government* ha redatto e pubblicato una mappa termico-ambientale per i 23 quartieri in cui è suddivisa la città, sviluppando linee guida per la mitigazione dell'effetto UHI. Tale studio si focalizzò, infatti, sull'analisi dell'ambiente termico urbano relativamente agli aspetti del rilascio di calore di origine antropica, della copertura del suolo, della struttura urbana ed degli spazi verdi.

Dal 2006 l'Università di Hong Kong ha condotto ricerche sulle UC-Map per contesti ad alta densità urbana, cercando di indagare le relazioni tra climatologia urbana, morfologia urbana e parametri urbanistici, facendo affidamento non solo su informazioni di uso del suolo, tipicamente impiegate nelle UC-Map delle medie città tedesche, ma anche su informazioni dettagliate alla scala edilizia (densità fondiaria, rapporti di copertura) (Ng et al., 2009).

Recentemente gli studi sulle UC-Map si sono diffusi in numerosi Paesi europei, asiatici e sud-americani (Figura 19). Dall'analisi della letteratura scientifica in

materia, si è rilevata l'assenza di studi compiuti su realtà nord-americane. L'Italia, tra i grandi Stati europei, è l'unico a non aver intrapreso iniziative di ricerca nel campo della mappatura del clima urbano.



Figura 19 - Studi sulle UC-Map nel mondo (Ren, 2015).

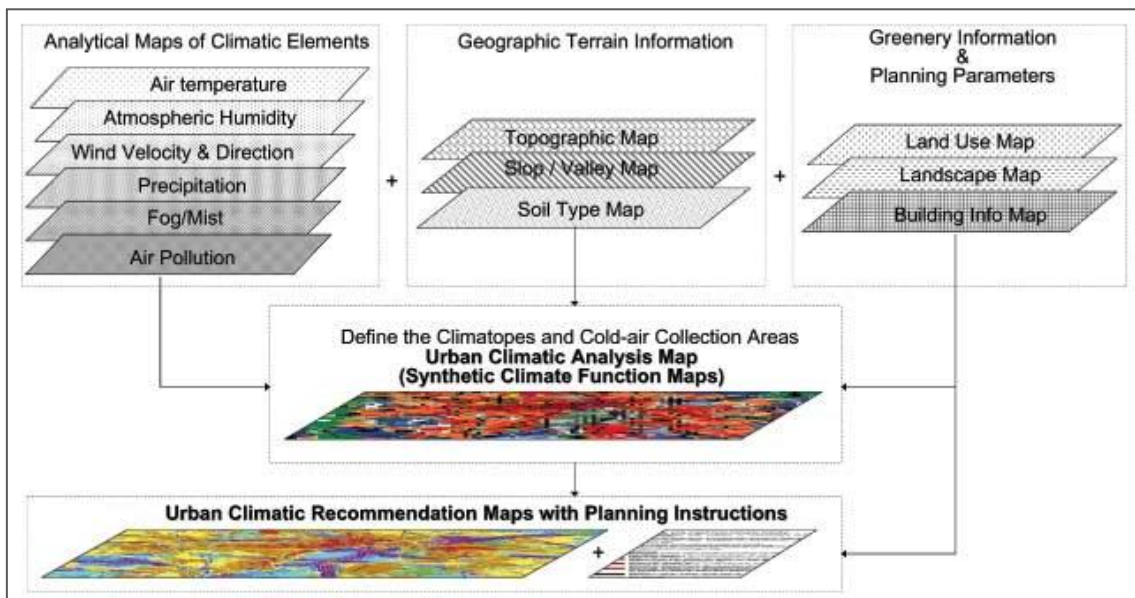


Figura 20 - Struttura di una UC-Map (Ren, 2015).

Struttura di una UC-Map

Una UC-Map è costituita, solitamente, da due componenti: una mappa di analisi del clima urbano (UC-AnMap) e una mappa delle indicazioni per la pianificazione urbanistica volte al miglioramento del clima urbano (UC-ReMap).

La UC-AnMap visualizza e spazializza le valutazioni di carattere climatico, suddividendo il territorio in diversi *climatopi*, anche detti *Unità omogenee di risposta climatica* (HCR units).

I *layer* di input di una UC-AnMap sono generalmente costituiti da mappe di analisi del clima e degli elementi meteorologici, informazioni sulla topografia, sulla distribuzione delle aree vegetate, sull'uso del suolo e sulla morfologia urbana.

La UC-ReMap, invece, comprende le indicazioni per la pianificazione urbanistica per il miglioramento del clima urbano (Figura 20).

Mappa di analisi del clima urbano

L'UC-AnMap rappresenta una piattaforma per la valutazione delle informazioni climatiche ed è costruita utilizzando come input dati relativi a fattori climatici ed all'uso del suolo, con riferimento a scenari medi annuali o stagionali.

L'output grafico di tale elaborazione è solitamente una mappa in cui le variazioni dei parametri sono indicate con scale di colori, frecce e simboli per spiegare i diversi risultati dell'analisi.

La redazione di una UC-AnMap prevede, generalmente, una prima fase di raccolta dei dati meteorologici (temperature medie, precipitazioni, vento, radiazione solare), dell'uso del suolo, della topografia e delle aree vegetate, e, successivamente, una seconda fase di combinazione dei suddetti livelli informativi al fine di comprendere i loro effetti sul bilancio energetico e termico a livello meso e/o micro-climatico, a seconda della scala di interesse.

I parametri climatici sono ricavati secondo modalità differenti attraverso:

- a) rilevamenti da stazioni fisse;
- b) rilevamenti da stazioni mobili;
- c) fluidodinamica computazionale (CFD);
- d) telerilevamento.

Tale ultima modalità è spesso utilizzata al fine di ottenere informazioni circa la temperatura superficiale degli ambiti urbani e calcolare l'intensità della UHI superficiale.

Un'altra categoria di dati di input è relativa ai dati topografici del territorio analizzato, fondamentali in quanto i fattori climatici sono direttamente influenzati dalla topografia (altitudine, orientamento e inclinazione dei versanti). I dati topografici sono solitamente ottenuti dai modelli di elevazione digitale (DEM), in formato *raster* a risoluzione variabile, processando i quali è possibile ottenere ulteriori utili livelli informativi, quali mappe delle pendenze e delle esposizioni.

Una UC-AnMap è caratterizzata da due principali aspetti analitici, ai quali in alcuni casi studio se ne affianca un terzo.

Il primo attiene alla temperatura e si concentra sull'analisi dell'effetto UHI e su zone caratterizzate da elevato stress termico.

Il secondo aspetto, invece, riguarda la ventilazione e si focalizza sui percorsi dei venti locali (direzione dei venti prevalenti, brezze di mare e di terra, di monte e di valle), percorsi d'aria esistenti o potenziali, zone di produzione di aria fredda, zone in cui la velocità media del vento è ridotta a causa dell'effetto barriera determinato dall'urbanizzazione.

Il terzo eventuale aspetto concerne l'inquinamento dell'aria all'interno dell'*Urban Canopy Layer* (Tabella 6).

Come già accennato in precedenza, con l'implementazione della UC-Map di Hong Kong, nel 2006, fu proposta una nuova metodologia di calcolo, valida per scenari urbani ad alta densità, con l'obiettivo di migliorare l'ambiente termico e la ventilazione urbana naturale della metropoli cinese. Per la UC-AnMap di Hong Kong non sono state prese in considerazione soltanto informazioni sull'uso del suolo, topografia, vegetazione e ventilazione, ma anche ulteriori parametri di morfologia urbana, quali la densità edilizia che incide sulla rugosità del suolo urbano, condizionando la ventilazione, e sulla capacità dell'ambiente costruito di assorbire calore.

Riconoscendo l'importanza della morfologia urbana nella determinazione del clima urbano, i ricercatori di Hong Kong hanno prodotto tre *layer* di input (volume del costruito, percentuale di copertura del suolo, prossimità agli spazi

aperti), con una risoluzione di 100 metri, da raffrontare con i *layer* descrittivi della topografia e della dotazione di spazi verdi (Figura 21). La classificazione in 8 climatopi ottenuta dalla combinazione dei *layer* di input è stata in seguito calibrata con dati della Temperatura Fisiologica Equivalente (PET), ottenuti attraverso una campagna di rilievi diretti.

Tabella 6 - Analisi e fenomeni climatici in una UC-AnMap (Ren, 2015).

Componente della UC-Map	Fenomeni climatici caratteristici	Aspetto analitico	Scala delle analisi climatiche
Mappa di analisi del clima urbano (UC-AnMap)	Analisi della circolazione locale dell'aria (canalizzazione del vento, brezze di mare e di terra, di monte e di valle)	Ventilazione	Meso-climatica (regionale) Micro-climatica (comunale, sub-comunale)
	Analisi della direzione prevalente del vento locale		
	Analisi dei percorsi d'aria esistenti e potenziali		
	Analisi delle zone di ventilazione (zone di produzione di area fredda)		
	Analisi e localizzazione dell'effetto barriera (zone urbanizzate)		
	Analisi delle aree soggette al fenomeno UHI	Temperatura	
	Analisi delle variazioni bioclimatiche urbane (localizzazione delle aree interessate elevati stress termici)		
	Analisi della qualità dell'aria e dell'inquinamento	Inquinamento	

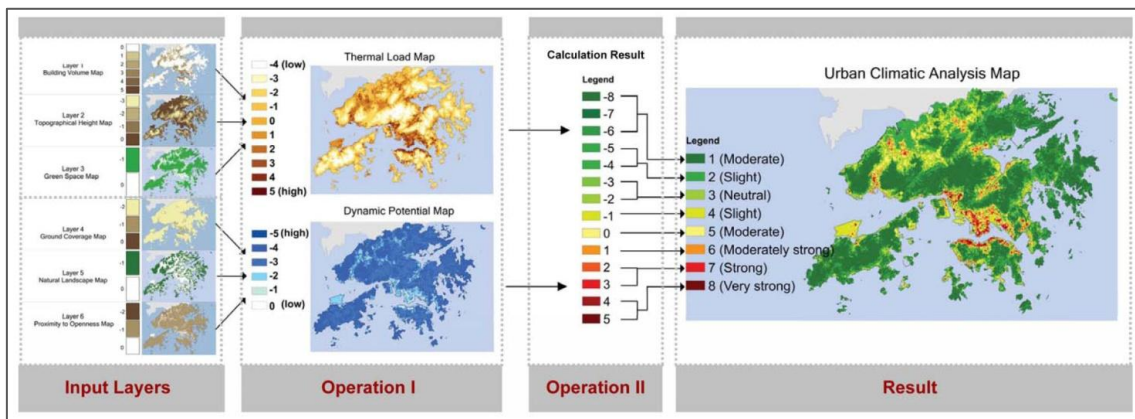


Figura 21 - Diagramma di flusso del processo di redazione della UC-AnMap di Hong Kong (Ren et al., 2011).

È opportuno segnalare che, dall'esame di più di 15 casi studio internazionali relativi alla redazione di UC-Map, nessuno di essi si è rivelato affrontare una approfondita lettura delle morfologie urbane, affidando ad un numero esiguo di parametri il compito di descrivere l'ambiente costruito (Figura 22).

I climatopi identificano le aree geografiche con caratteristiche microclimatiche simili. Essi sono solitamente distinti in relazione a due parametri caratteristici delle UC-AnMap: il *Carico Termico*, o *Thermal Load* (TL), e il *Potenziale Dinamico*, o *Dynamic Potential* (DP).

Il Carico Termico è espressione dell'intensità di calore immagazzinato o emesso dalle aree urbane. Esso ha un effetto sull'aumento della temperatura dell'aria all'interno del *Urban Canopy Layer*, principalmente dipendente dal volume degli edifici (che influenza l'accumulo di calore, diminuendo lo SVF e rallentando il raffrescamento della città durante la notte), dalla topografia, e dalla disponibilità di spazi verdi.

Il Potenziale Dinamico, invece, dipende principalmente dalla rugosità del terreno che influenza la ventilazione e il ricambio dell'aria delle aree urbane. I fattori principali per la valutazione del Potenziale Dinamico comprendono la copertura del suolo da parte degli edifici, e la prossimità al paesaggio naturale e agli spazi aperti, per tenere conto dell'influenza di brezze di terra e di mare. L'uso del suolo, come già ricordato, ha assunto nei primi studi sulle UC-Map un ruolo preponderante nella definizione dei climatopi, tanto da orientarne in

maniera significativa la nomenclatura, come nel caso della UC-AnMap di Stoccarda (Klimaatlas, 1992; VDI, 1997) (Figura 23).

Nella UC-AnMap le informazioni areali sono talvolta rafforzate con simbologie impiegate per fornire ulteriori dettagli quali:

- a) aree per lo scambio d'aria fredda (zone collinari);
- b) inquinamento atmosferico (traffico veicolare);
- c) emissioni nocive;
- d) aree ad elevato rischio di inquinamento dell'aria;
- e) nebbia;
- f) zone di inversione della temperatura;
- g) direzione, frequenza e velocità media annuale dei venti (rosa venti);

In conclusione della rapida rassegna offerta su alcuni celebri casi studio volti all'implementazione di UC-Map, è bene evidenziare la scarsa o incompleta considerazione di indicatori descrittivi della morfologia urbana, sebbene sia evidente la relazione che lega la forma degli insediamenti urbani all'incremento di temperatura che in essi si rileva.

6.5 Mappa delle raccomandazioni per la pianificazione urbanistica

Sulla base dei risultati ottenuti dalla UC-AnMap e dopo l'individuazione dei diversi climatopi, sono solitamente implementate linee guida e programmi di azioni e raccomandazioni mirate ad attenuare e mitigare gli effetti climatici negativi (Baumüller et al., 1992). La transizione da UC-AnMap a UC-ReMap risulta essere necessaria per poter tradurre la spazializzazione delle informazioni climatiche in strumento di pianificazione urbanistica. L'UC-ReMap, dunque, identifica le zone climaticamente più sensibili e problematiche che necessitano di azioni strategiche e/o ulteriori approfondimenti analitici.

Tipo	Caso studio	Risoluzione della mappa	Meteoclimatici		Dati		Ambito urbano	Inquinamento
			Temperatura e umidità		Topografia	Uso del Suolo		
				Ventilazione				
Grandi metropoli	Tokyo	500 m	UHI (Cause)	Direzione del Vento (rilievi diretti; esperimenti; simulazioni numeriche)			Rapporto di copertura; altezza degli edifici;	
	Yokohama		Temperatura (dati osservati)	Direzione e velocità del vento (dati osservati)				
	Pechino	4 km						
		1,5 km	Temperatura superficiale (dati simulati)	Distribuzione della velocità media annuale del vento				
		10 m		Simulazione della direzione e della velocità del vento in due scenari				
	Osaka	1:25000	Temperatura (dati osservati)	Vento	Dem	Uso del suolo categorizzato secondo il cambio di temperatura superficiale		
	Ho Chi Minh	100 m; 25 m		Venti di background; venti termicamente indotti	Dem	Mappa di uso del suolo	Volume degli edifici; superfici impermeabilizzate; aree vegetate (NDVI)	
	Wuhan	100 m		Probabilità e direzione dei venti prevalenti			Volume degli edifici;	
	Hong Kong	100 m	Temperatura (dati osservati) espressa in PET	Simulazione della direzione e della velocità del vento e dati osservati	Mappa topografica	Mappa delle aree naturali; mappa delle aree prossime alle aree naturali	Volume degli edifici; mappa del verde; livello di copertura del suolo;	
	Hesse	100 m		Dati meteorologici	Dem	Mappa di uso del suolo	Parametri edilizi	
Grandi città	Singapore			Rosa dei venti annuale	Dem	Mappa di uso del suolo	Volume degli edifici; superfici impermeabilizzate; verde urbano	
	Salvador		Temperatura, umidità relativa, radiazione globale (dati osservati)	Direzione e velocità del vento (dati osservati); carta della distribuzione della velocità del vento (distanza dal mare; corridoi d'aria; asperità delle superfici)	Mappa topografica	Mappa di uso del suolo	Densità edilizia; verde urbano; larghezza delle strade	
	Berlino	50 m	Temperatura superficiale (notte e giorno; dati osservati); condizioni di temperatura e umidità notturne;			Mappa di uso del suolo	Superfici impermeabilizzate; spazi verdi e aperti; densità edilizia	
		10 m					Altezza degli edifici; informazioni di dettaglio sul verde urbano	
	Kaohsiung	50 m	Intensità dell'UHI (dati osservati e simulati)	Informazioni sui venti prevalenti; effetto delle brezze di terra e di mare; idrografia	Mappa topografica	Arece naturali; idrografia; mappa di uso del suolo	Densità di popolazione	
	Lisbona		Intensità dell'UHI (dati osservati e simulati)	Variazione spaziale delle caratteristiche del vento	Dtm	Mappa di uso del suolo	SVF (12 stazioni); densità edilizia	
	Campinas		Temperatura superficiale	Atlante del vento (asperità della superficie)	Mappa topografica	Mappa di uso del suolo	Densità edilizia;	
	Manchester	200 m	Dati di temperatura (minimo, massimo, media); precipitazioni		Dtm	Mappa di uso del suolo	Altezza degli edifici; rapporto di copertura e permeabilità; percentuale di aree verdi	Emissioni di sostanze inquinanti
	Bilbao			Caratteristiche dei venti regionali e delle circolazioni i termoindotte	Dtm	Mappa di uso del suolo	Altezza degli edifici; superficie coperta; vegetazione (NDVI)	
	Harnem			Mappa della ventilazione	Mappa topografica (pendenze)	Mappa di uso del suolo	Densità edilizia; SVF (5 stazioni);	

Figura 22 - Quadro sinottico dei livelli informativi impiegati in casi studio internazionali nella redazione della UC-AnMap.

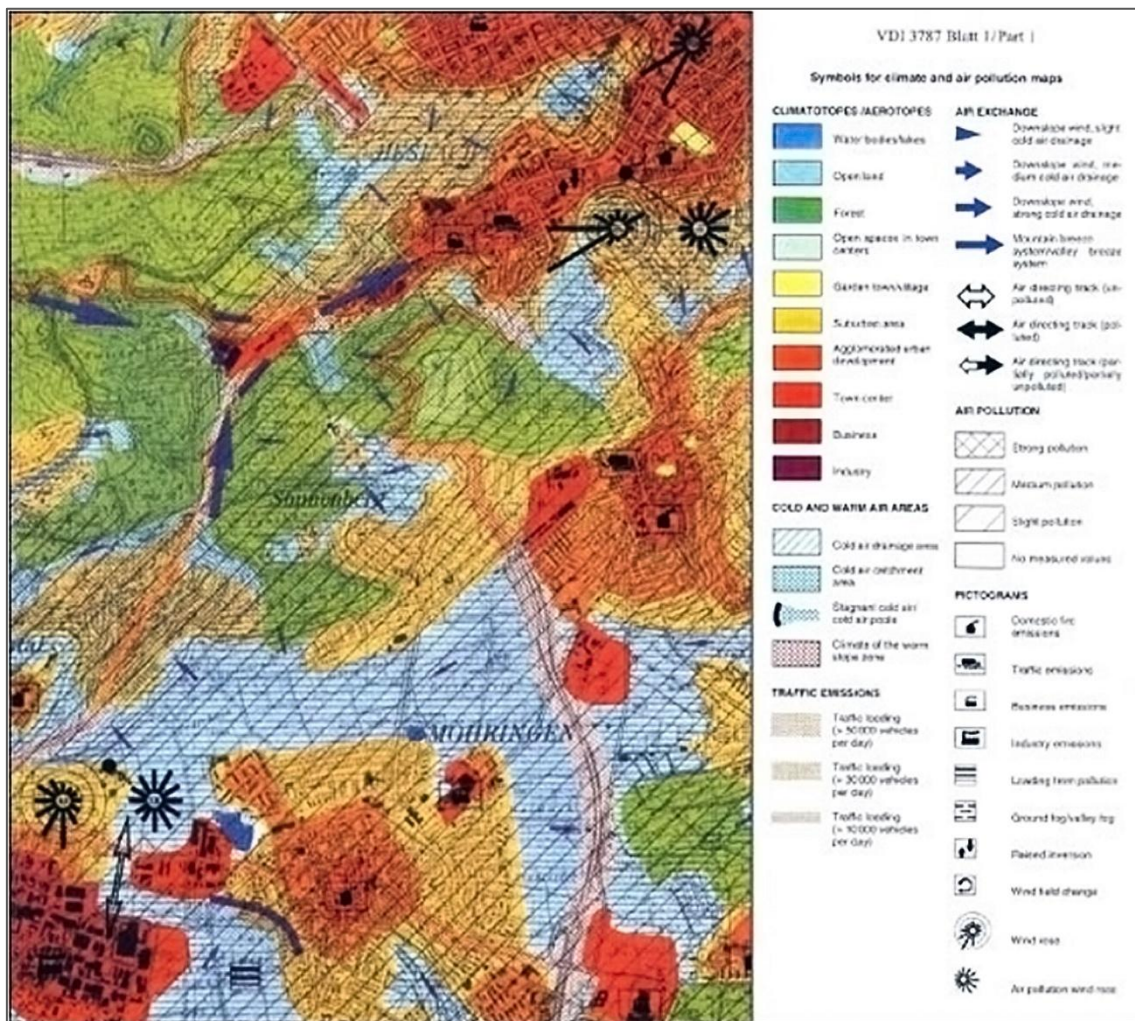


Figura 23 - Stralcio della UC-AnMap di Stoccarda e relativa legenda (Klimaatlas, 1992; VDI, 1997).

Indipendentemente dalle caratteristiche climatiche locali, la UC-ReMap dovrebbe sempre perseguire alcune strategie standard schematizzate di seguito:

- le aree vegetate hanno un effetto rilevante sul clima locale poiché sono responsabili della raffreddamento dell'aria, con particolare riferimento alle ore notturne; gli spazi verdi urbani svolgono un ruolo importante dal punto di vista microclimatico nelle aree ad essi contermini; la vegetazione posta ai bordi delle aree urbanizzate contribuisce al ricambio d'aria; in definitiva, attesi i numerosi benefici dovuti alla loro presenza, gli spazi verdi non dovrebbero essere contemplati come aree di trasformazione per nuovi insediamenti;

- b) lo sviluppo insediativo in aree vallive, collinari e pedemontane dovrebbe essere considerato negativo dal punto di vista climatico, dal momento che in tali aree, in condizioni di vento debole, si originano movimenti di aria fresca e che le valli costituiscono dei corridoi per i venti regionali più intensi;
- c) la caotica espansione urbana, nonché zone di disturbo attorno ai centri abitati sono da evitare; lo sviluppo urbano dovrebbe tener conto dei corridoi di ventilazione e delle aree di produzione d'aria fresca;
- d) nuove attività commerciali ed industriali e, di conseguenza, le emissioni da essi provocate, non devono sovrapporsi ai percorsi d'aria a servizio delle aree residenziali limitrofe.

La gestione del territorio in chiave bioclimatica deve essere, dunque, orientata a mitigare l'effetto UHI, favorire la ventilazione naturale e migliorare la qualità dell'aria. In particolare, gli interventi mirano principalmente a:

- ridurre il carico termico urbano;
- controllare la densità edilizia;
- migliorare il potenziale dinamico urbano;
- conservare e migliorare i percorsi urbani di ventilazione esistenti;
- tracciare nuovi percorsi di aria ove necessario;
- preservare, mantenere e migliorare, la produzione di aria fredda delle aree verdi prossime alle zone urbane;
- preservare, mantenere e sfruttare le brezze marine e terrestri;
- preservare, mantenere e migliorare il verde urbano;
- ridurre il rilascio di sostanze inquinanti, gas serra e calore di origine antropica.

Vantaggi nell'impiego di una UC-Map

L'UC-Map è un'elaborazione interdisciplinare che consente il dialogo tra la climatologia urbana e la pianificazione urbanistica. La sua componente analitica, la UC-AnMap, è in grado di suggerire ai pianificatori, in maniera diretta e inequivocabile, quali siano le zone colpite dai fenomeni climatici più significativi. In tal modo, pianificatori e decisori possono operare sul territorio

in maniera pienamente consapevole rispetto alla vulnerabilità della città o di sue parti ai fenomeni climatici.

La UC-Map, inoltre, consente di sensibilizzare le amministrazioni locali, le quali non possono ignorare le problematiche presenti nelle aree più sensibili, delle quali la UC-Map restituisce un quadro evidente.

In ultimo, la struttura di una UC-Map, della quale, solitamente, è parte integrante un database geografico, è aggiornabile digitalmente grazie all'ormai diffusissimo uso dei *software* GIS.

Limitazioni alla redazione e all'uso di una UC-Map

È importante considerare che la UC-Map mira a fornire informazioni climatiche alla scala urbana. Una risoluzione tipica per queste mappe è di 100 m (Ren et al, 2011; Chen e Ng, 2011). Di conseguenza, anomalie alla scala locale non sono considerati in una UC-Map.

Per scelte di pianificazione urbana da adottarsi a livello di strada o di quartiere, l'UC-Map è certamente necessaria ma non del tutto sufficiente e si rendono doverose ulteriori analisi microclimatiche. In altre parole, una mappatura del microclima urbano deve essere affrontata in un modo diverso rispetto alle UC-Map, conducendo analisi delle variabili climatiche e del comfort termico con modelli di fluidodinamica computazionale (come, ad esempio, il modello-ENVI), che includono le interazioni tra atmosfera, superficie terrestre e tutti gli elementi urbani. È ugualmente importante, tuttavia, che i singoli interventi di progettazione urbana alla microscala seguano le raccomandazioni per il clima urbano redatte alla mesoscala, così da inquadrarli una prospettiva generale di miglioramento e risanamento di tutto il clima urbano.

L'ostacolo ad una ampia diffusione delle UC-Map è costituito dalla sostanziale dipendenza del processo dalle analisi climatologiche. Per quanto sia uno strumento volto ad incidere sulla pianificazione urbanistica, la UC-Map è contraddistinta da una robusta fase analitica da condurre attraverso metodi e modelli propri della climatologia urbana.

Gli sforzi della ricerca in tema dovrebbero, infatti, orientarsi verso la realizzazione di protocolli operativi, che facciano leva sulle ormai note relazioni

tra morfologia dell'ambiente costruito e fattori climatici per identificare i climatopi attraverso parametri e quantità proprie del bagaglio tecnico-culturale del pianificatore.

Il correttivo che l'attività di ricerca svolta ha inteso proporre è una metodologia per la redazione di una mappa per l'adattamento al *climate change* in cui la descrizione della morfologia urbana assume un ruolo centrale nella descrizione del clima della città e, dunque, nell'identificazione delle strategie e degli interventi da mettere in essere. A tal riguardo, il lavoro di ricerca ha riguardato la selezione di indicatori e metriche capaci di descrivere quegli aspetti della forma degli insediamenti urbani che sono responsabili dell'alterazione del clima urbano, cercando di innovare i consolidati percorsi metodologici per la costruzione dei quadri conoscitivi propri delle UC-Map, esclusivamente basati su alcuni parametri urbanistici.

CAPITOLO 7 - Misurare la forma della città per caratterizzare il clima urbano

Morfologia urbana e mappe di clima urbano

La forma urbana include i caratteri bidimensionali e tridimensionali della città e la sua composizione materiale. Una superficie urbanizzata è sostanzialmente impermeabile e, pertanto, presenta un contenuto d'acqua bassissimo. In assenza di acqua e vegetazione, le superfici della città trasferiscono energia all'aria circostante sotto forma di calore sensibile. Se tali superfici, inoltre, presentano coefficienti di albedo molto bassi, le condizioni di *discomfort* termico in città si aggravano ulteriormente in quanto la quasi totalità della radiazione solare incidente è assorbita e riemessa nell'atmosfera per irraggiamento.

La configurazione tridimensionale degli ambienti urbani, inoltre, ostruisce la ventilazione, riducendone la velocità, incrementa la quota di radiazione solare assorbita dalle superfici urbane attraverso riflessioni multiple sulle facciate degli edifici.

Il fenomeno dell'UHI costituisce il più evidente e gravoso risultato dell'interazione tra l'atmosfera e il complesso di fattori che definiscono la morfologia urbana.

Non è solo la forma degli insediamenti urbani ad incidere sull'alterazione del clima locale da parte delle città. Le attività che si svolgono al suo interno e la loro distribuzione sul territorio determinano un pressoché continuo consumo di energia, utilizzata per riscaldare, raffreddare e illuminare gli edifici, produrre beni e servizi, consentire lo spostamento di persone e merci. Ciò, a causa della quota predominante di produzione energetica soddisfatta dai combustibili fossili, determina l'emissione in atmosfera di gas serra, principali responsabili del cambiamento climatico, i cui effetti più drammatici – innalzamento del livello medio del mare, intensificazione di eventi climatici estremi quali precipitazioni intense e ondate di calore – mettono in serio pericolo la sicurezza territoriale delle città e la salute delle comunità in esse insediate.

Come già accennato nel precedente capitolo, l'effetto UHI comporta una città più calda che, a sua volta, determina un aumento delle richieste di energia per il

condizionamento meccanico degli edifici, più calore immesso in atmosfera, più gas serra emessi.

La conoscenza di alcune caratteristiche fisiografiche dei tessuti urbani, dei materiali e delle strutture che li compongono, nonché delle attività che al loro interno hanno luogo, sono elementi essenziali per descrivere il fenomeno dell'UHI (Baklanov et al., 2004) e, dunque, per definire la predisposizione di un ambito urbano ad accumulare calore.

Al fine di pianificare una strategia di intervento sulla città tesa a contrastare gli effetti del *climate change*, risulta necessario spazializzare le informazioni climatiche mediante la redazione di una UC-Map, la cui componente analitica non può non tenere debitamente in conto gli aspetti connessi alla morfologia urbana.

L'utilizzo di modelli di simulazione propri della climatologia urbana per analizzare l'interazione tra le aree urbane e le caratteristiche meteorologiche risulta, da un lato, costoso in termini di tempo e di risorse, e, dall'altro, difficilmente perseguibile da parte dei pianificatori per mancanza delle necessarie conoscenze.

Tali modelli, dunque, potrebbero non essere in grado di tenere il passo con i tempi del processo di pianificazione e, certamente, non rispondono all'esigenza di fornire un chiaro strumento di interpretazione degli effetti che scelte di pianificazione potrebbero avere sul clima urbano.

Risulta, pertanto, fondamentale colmare il *gap* ancora esistente tra urbanistica e climatologia urbana nell'ambito della redazione di UC-Map attraverso la costruzione di livelli informativi capaci di descrivere le relazioni tra morfologia urbana e fattori climatici.

La ricerca scientifica in materia di mappatura del clima urbano non ha ancora contemplato una metodologia di analisi dell'ambiente costruito che tenga conto compiutamente dei molteplici aspetti della morfologia urbana aventi maggiore incidenza sul *comfort* termico. Tali aspetti, infatti, sono solitamente presi in considerazione separatamente, in relazione ai soli fattori climatici sui quali incidono maggiormente.

Studi significativi, ad esempio, sono stati condotti per testare l'affidabilità di metodi di mappatura che tenessero in conto l'interazione tra ventilazione e

morfologie insediative ad alta densità (Ng et al., 2011) ovvero tra temperatura delle aree urbane e lo SVF (Chen et al., 2010) o il grado di urbanizzazione (Morabito et al., 2016).

Sono meno presenti, invece, in letteratura, studi sistematici che analizzino la relazione tra i fattori di clima urbano e la configurazione, all'interno di ambiti urbanizzati, di *servizi ecosistemici di regolazione*, definiti dal *Millennium Ecosystem Assessment* (MA) come quei servizi che gli ecosistemi forniscono agendo come regolatori della qualità dell'aria e del suolo. Tra essi, rientra, di fatto, il verde urbano che ha il ruolo di regolare il clima locale, nonché la qualità dell'aria, minimizzando l'esposizione di edifici e superfici opache alla radiazione solare, rimuovendo inquinanti dall'atmosfera, regolando le precipitazioni (MA, 2005).

L'eterogeneità spaziale dei tessuti insediativi delle città impone la necessità di superare i tradizionali meccanismi di analisi e di valutare la morfologia urbana selezionando accuratamente indicatori che ne descrivano la capacità di influenzare il clima urbano.

Il presente Capitolo, dunque, offre una panoramica delle tecniche e dei parametri di analisi dei tessuti insediativi e della morfologia urbana, con particolare riferimento alle grandezze e alle caratteristiche che, sulla base dei principi fisici descritti nella Parte II, possono determinare un incremento della temperatura degli ambiti urbani.

Caratterizzare e misurare la forma della città

La morfologia urbana è lo studio della forma della città, delle sue variazioni e delle cause che concorrono alla determinazione e alla modificazione della sua struttura e del suo territorio. Il termine è equivocamente usato anche per definire la cosa stessa della quale costituisce lo studio (morfologia urbana è insieme la struttura urbana e il suo studio).

Essa è stata definita anche come lo studio della città come *habitat* dell'uomo (Moudon, 1997).

Lo studio della morfologia urbana si fonda sull'idea che la città fisica si formi come struttura di parti correlate, storicamente modificantisi secondo leggi

determinate e con ricorrenza di certe costanti e che, perciò, essa sia indagabile scientificamente attraverso descrizione, comparazione, classificazione, dei fenomeni singolari nei loro processi di trasformazione.

Gli studiosi di morfologia urbana indagano l'evoluzione della città dal suo periodo fondativo attraverso le successive trasformazioni da essa subita, identificando e analizzando le sue varie componenti.

Edifici, strade, spazi pubblici, monumenti sono tra i principali elementi oggetto di analisi morfologiche. In ogni caso, essi sono costantemente utilizzati e, dunque, trasformati nel corso del tempo, e permangono in uno stato di stretta e dinamica mutua interrelazione: le costruzioni conformano e sono conformate dagli spazi aperti e dalle strade che le circondano.

La morfologia urbana cominciò ad assumere la forma di un campo organizzato del sapere alla fine del XIX secolo, con gli studi di alcuni geografi di lingua tedesca. Presumibilmente, il padre della morfologia urbana fu il geografo Otto Schlüter il quale immaginava la città come parte di un paesaggio più ampio. Sotto la sua influenza, il paesaggio urbano andò ad occupare un posto di rilievo nel campo della geografia antropica nelle prime tre decadi del XX secolo. L'aspetto chiave dell'approccio proposto da Schlüter fin dal principio era rappresentato dalla mappatura delle diverse forme fisiche all'interno delle aree urbane. Si ricordano, a tal riguardo, gli studi di Hassinger (1916) per la mappatura degli stili architettonici della città di Vienna o la mappa di uso del suolo, degli edifici e del numero di negozi nei fabbricati residenziali del centro di Danzica realizzata da un allievo di Schlüter, Walter Geisler (1918), il cui lavoro influenzò uno dei più celebri studiosi di morfologia urbana del '900, M. R. G. Conzen (Whitehand, 2007).

Conzen, (1907-2000), geografo tedesco emigrato nel Regno Unito negli anni '30, noto per il suo dettagliato studio sulla cittadina di Alnwick, dovette superare la rivoluzione quantitativa post-bellica della geografia, che ignorò le sue ricerche induttive ed empiriche per presunta mancanza di rigore e capacità predittiva.

Fu proprio Conzen a proporre la divisione della forma urbana in tre parti: in primis, il piano campagna, comprendente il sito, le strade, i lotti e gli isolati; in

secondo luogo, le strutture edificate, ovvero la forma tridimensionale; infine, l'uso del suolo e dei fabbricati (Conzen, 1960).

Altro studioso influente nel campo della morfologia urbana fu Saverio Muratori (1910-1973), architetto italiano e professore alle Università di Roma e Venezia.

Muratori, il quale fece della *storia operante*, termine da lui coniato, di Venezia e Roma, la base teorica per i suoi studi sul progetto architettonico, fu scientificamente isolato dai suoi colleghi modernisti del tempo.

In Italia, Gianfranco Caniggia (1933-1987) proseguì gli studi di Muratori, di cui fu allievo, portando avanti la tradizione della *tipologia procedurale*, focalizzata sulla convinzione che le tipologie edilizie sono l'unità elementare della forma urbana (Moudon, 1997).

Una terza scuola, dopo quelle inglese e italiana, emerse nel campo della morfologia urbana in Francia alla fine degli anni '60, quando gli architetti Philippe Panerai e Jean Castex, con il sociologo Jean-Chales DePaule, fondò la Scuola di Architettura di Versailles.

È largamente riconosciuto che, a livello elementare, la morfologia urbana si basi su tre principi (Moudon, 1997):

- 1) la forma urbana è definita da tre elementi fondamentali quali edifici e i relativi spazi aperti, lotti e strade;
- 2) la forma urbana può essere compresa a differenti livelli di risoluzione; quattro sono i livelli solitamente riconosciuti, corrispondenti a edificio/lotto, strada/isolato, città, regione;
- 3) la forma urbana può solo essere compresa in un'ottica di evoluzione storica in quanto gli elementi di cui è composta sono sottoposti a continue trasformazioni e sostituzioni.

Dunque, *forma*, *risoluzione* e *tempo*, costituiscono le tre componenti fondamentali in tema di morfologia urbana, presenti in tutti gli studi condotti, da architetti così come da geografi, su città del passato così come su città contemporanee.

Ci sono una serie di elementi fisici che concorrono attivamente alla definizione dello spazio e alle sue prestazioni. Salat definisce tre rapporti per la comprensione della rilevanza degli elementi fisici per le prestazioni della forma urbana (Salat et al., 2011):

- 1) alla scala della città, esiste una relazione di reciprocità tra la tipologia degli isolati e la tassonomia delle griglie stradali;
- 2) alla scala di tessuti urbani, esiste un rapporto di reciprocità tra tipologie edilizie e morfologia urbana;
- 3) i due rapporti di reciprocità sono fondamentali per chiarire la struttura delle vicende urbane.

Per quanto attiene all'identificazione degli elementi della forma urbana, Lynch nel suo approccio al concetto dell'*immagine della città* e di ciò che le persone identificano come elementi importanti in una città, identifica 5 tipi (Lynch, 1960):

- *percorsi*, strade, camminate, passaggi, e altri canali utilizzati dalla gente per spostarsi;
- *margini*, confini e limiti ben percepiti come mura, edifici, spiagge;
- *quartieri*, sezioni relativamente larghe della città contraddistinte da caratteri specifici e da una propria identità;
- *nodi*, punti focali della città, intersezioni tra vie di comunicazione, punti d'incontro;
- *riferimenti*, oggetti dello spazio velocemente identificabili, anche a distanza, che funzionano come punto di riferimento e orientamento.

Per ciò che concerne le metriche utilizzate per misurare la morfologia urbana, uno degli aspetti più interessanti è l'osservazione della struttura urbana nel tempo. Tuttavia, gli studi classici di morfologia urbana cadono in difetto innanzi alle nuove 'forme urbane'. L'analisi frattale si presenta come un potente mezzo per la descrizione spaziale dei tessuti urbani. La geometria frattale, introdotta in origine da Mandelbrot (1982) e dai primi anni Novanta sperimentata per la lettura e la comprensione del tessuto urbano (Batty, Longley, 1986), è incentrata sui concetti di *omotetia* e di *multiscalarità*. Un oggetto frattale si riproduce a sé identico (*self-similarity*) a diverse, successive e sequenziali scale di rappresentazione, tanto che le differenze fra ogni singola parte dell'organismo complessivo ed il tutto altro non sono, in definitiva, che una differenza apparente, dipendente dalla scala di rappresentazione e di osservazione dell'oggetto. Applicando, pertanto, gli elementi della geometria frattale all'analisi del territorio urbano e suburbano risulta possibile fornire un apprezzamento del tessuto edilizio e della sua

articolazione al suolo mediante la determinazione della dimensione frattale dell'oggetto planimetrico posto sotto analisi (Cutini, 2012).

Inoltre, la quantificazione dell'eterogeneità spaziale è necessaria per chiarire le relazioni tra la componente ecologica dei tessuti insediativi e la morfologia urbana.

Pertanto, le misure, le analisi e le interpretazioni della morfologia urbana hanno assunto rilevanza di primo piano nell'ecologia di paesaggio o *landscape ecology* (Haines et al., 1996). Una grande varietà di metriche di composizione del paesaggio (ad esempio, il numero e l'ammontare di differenti tipi di *patch*) e di configurazione dello stesso (la distribuzione spaziale di detti tipi) è stata sviluppata per dati categorici. Alcuni *software* sono stati implementati (ad esempio, FRAGSTATS, McGarigal and Marks, 1995; McGarigal et al., 2002), e molte metriche sono state anche integrate all'interno di comuni software Gis (ad esempio, Patch Analyst in ArcGIS).

Molte di queste metriche sono sensibili ai cambiamenti nella risoluzione spaziale del dato o all'estensione dell'area di paesaggio analizzata (Wickham and Riitters, 1995), e numerose risultano essere le correlazioni presenti tra gli indici sviluppati (Riitters et al., 1995; Cain et al., 1997). L'adattamento alla scala delle metriche di paesaggio per la determinazione di indici funzionali alla descrizione della morfologia urbana rimane ancora una sfida (Mander et al., 2005).

Forma urbana e clima: gli indicatori significativi

Nel presente paragrafo si intende fornire una descrizione dei principali parametri ed indicatori in grado di descrivere quegli aspetti della morfologia urbana che modificano l'interazione tra superfici urbanizzate e atmosfera. Essi si riferiscono sia alle costruzioni che agli spazi non edificati. Particolare attenzione è dedicata alle metriche di *landscape ecology*, attraverso cui descrivere la distribuzione delle superfici verdi all'interno del tessuto urbanizzato.

Gli indicatori capaci di descrivere gli aspetti della morfologia dei tessuti insediativi maggiormente incidenti sul clima urbano possono essere classificati come segue:

- 1) Parametri topografici, quali altitudine e pendenza del suolo, che ne influenzano la ventilazione;
- 2) Indici e rapporti urbanistici e ulteriori parametri descrittivi della forma del costruito, come, ad esempio, densità edilizia, rapporto di copertura e di impermeabilizzazione, altezza media dei fabbricati, *sky-view factor*, che incidono sui termini del bilancio radiativo delle superfici urbanizzate, determinando un incremento della temperatura dell'aria;
- 3) Parametri descrittivi del verde urbano, sia in termini di quantità che in termini di configurazione e distribuzione; le caratteristiche del verde urbano sono di fondamentale importanza per attenuare gli effetti negativi della consistente impermeabilizzazione dei suoli delle aree urbane.

Si fornisce, di seguito, una approfondita descrizione degli indicatori di morfologia urbana più significativi dal punto di vista climatico.

Parametri topografici

Si è già discusso, nei paragrafi precedenti, di come caratteristiche geografiche locali del territorio siano fondamentali per la determinazione di un clima locale. Risulta, pertanto, essenziale, in un esame completo delle caratteristiche morfologiche di un'area urbana, valutare alcuni aspetti relativi alla topografia dei luoghi in cui essa sorge.

L'altitudine è, indubbiamente, il parametro che maggiormente incide sulla temperatura dell'aria in quanto, salendo di quota lungo il versante di un rilievo, la temperatura dell'aria diminuisce (0,65 °C ogni 100 m).

Essa è calcolabile come differenza tra il livello medio del suolo di una determinata area e il livello medio del mare.

Ulteriore fattore da tenere in considerazione è la pendenza del suolo in quanto, in corrispondenza di suoli fortemente inclinati si generano circolazioni d'aria termo-indotte (brezze di monte e di valle) capaci di modificare sensibilmente i valori di temperatura dell'aria.

La pendenza m in un particolare punto del suolo è definita matematicamente come la tangente dell'angolo θ di inclinazione, espresso in gradi:

$$m = \tan \theta$$

La pendenza in percentuale ($m\%$) si ottiene moltiplicando m per 100:

$$m\% = 100 \cdot \tan \theta$$

Altitudine e pendenza del suolo sono parametri facilmente computabili nelle comuni applicazioni GIS, nell'ipotesi di disporre di un modello digitale del terreno relativo all'area oggetto di analisi.

Indici e rapporti urbanistici

Altezza media

L'altezza media degli edifici, o *Mean Height*, è la media delle altezze degli n corpi di fabbrica presenti nell'area A oggetto di analisi:

$$MH = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} [m]$$

Conoscendo sia il volume V , che la superficie coperta Sc di tutti gli n fabbricati presenti all'interno dell'area A , MH risulta calcolabile anche come rapporto tra di essi:

$$MH = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\sum_{i=1}^n Sc_i} [m]$$

L'altezza media dei fabbricati è un parametro di fondamentale importanza in quanto coincide con l'altezza dell'*Urban Canopy Layer*, lo strato atmosferico più prossimo al suolo nel quale si verifica il maggior aumento dell'aria sovrastante le aree urbanizzate.

Rapporto di copertura

Il Rapporto di copertura, o *Land Cover Ratio* (LCR), deriva dal rapporto tra la Superficie coperta degli n corpi di fabbrica insistenti nell'area A oggetto di analisi, l'area A stessa:

$$LCR = \frac{\sum_{i=1}^n S c_i}{A} \left[\frac{m^2}{m^2} \right]$$

Esprime la percentuale dell'area A occupata da costruzioni. Insieme con la Densità edilizia consente di effettuare una lettura dell'utilizzazione del suolo associata alle tipologie edilizie prevalenti. Un esempio ci è dato dalla classificazione proposta da Piccinato che definisce l'intensità d'uso del suolo urbano in 12 classi, definite a partire dal Rapporto di Copertura e dal numero dei piani dei fabbricati (Piccinato, 1988) (Figura 24).

Valori del Rapporto di copertura superiori al 50% sono espressione di una utilizzazione intensiva del suolo, di limitata presenza di superfici vegetate, di *Aspect Ratio* (H/W), contenuto.

Il Rapporto di Copertura, pertanto, influenza lo scambio radiativo delle superfici della città, determinando un incremento della temperatura dell'aria.

Nelle comuni applicazioni tecniche è facilmente calcolabile disponendo del livello informativo relativo alla proiezione orizzontale dei fabbricati, estraibile, ad esempio, da una cartografia numerica.

Densità edilizia

La Densità edilizia, o *Building Density* (BD), anche nota come Indice di fabbricazione, deriva dal rapporto tra il volume V degli n corpi di fabbrica insistenti nell'area A oggetto di analisi, l'area A stessa:

$$BD = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{A} \left[\frac{m^3}{m^2} \right]$$

La questione della BD rappresenta un elemento oggetto di approfondita trattazione in molti dei testi e manuali di urbanistica degli anni '50 e '60. Rigotti, ad esempio, affida alla densità il ruolo di elemento descrittore della realtà urbana, insieme con i tradizionali parametri edilizi quali Altezza media, Rapporto di Copertura e orientamento (Rigotti, 1952) (Figura 25).

Destinazione delle aree secondo il piano regolatore		N° piani	Altezza m. mass.	Rapporto di copertura area	Indice di utilizzazione	N° abitanti per ettore Densità edilizia
A	Zona rurale Case rurali	2	8	Da $\frac{1}{100}$ a $\frac{1}{50}$	—	—
B	Zona estensiva a padiglione	1	5	$\frac{1}{10}$	1	—
C	Zona estensiva a casette e villini	2	8	$\frac{2}{10}$	4	104
D	Zona estensiva a casette a schiera	2	7	$\frac{3}{10}$	6	156
E	Zona estensiva a villette	3	11	$\frac{2}{10}$	6	156
F	Zona semintensiva isolato o palazzine	3	12	$\frac{3}{10}$	9	234
G	Zona semintensiva o case in serie	3 ÷ 4	12 ÷ 17	$\frac{4}{10}$	16 12	312 416
H	Zona intensiva continua	4	17	$\frac{5}{10}$	20	520
I	Zona intensiva continua	5	20	$\frac{5}{10}$	25	650
L	Zona intensiva continua	6	22	$\frac{5}{10}$	30	780
M	Zona intensiva isolati o case alle	10	32	$\frac{1}{10}$	10	260
N	Zona intensiva chiuso	4 ÷ 6	17 ÷ 23	$\frac{6}{10}$	36 24	624 936

Figura 24 - Classificazione di tipi edilizi in base al LCR e al numero di piani dei fabbricati (Piccinato, 1988).

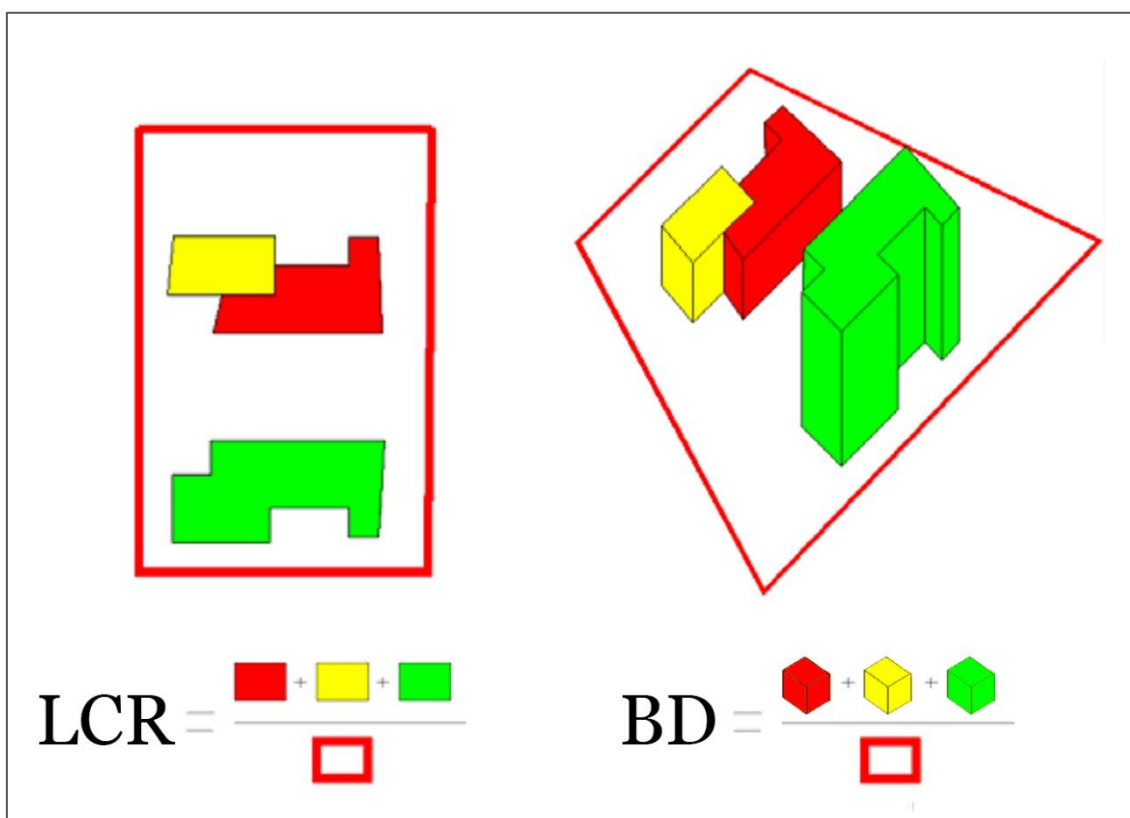


Figura 25 - Rappresentazione schematica del calcolo del *LCR* e della *BD*.

Ad alti valori di densità edilizia corrispondono valori altrettanto alti dell'Altezza media e dello *sky-view factor*. Ciò determina la creazione di *canyon urbani* e una generale alterazione della riflessione della radiazione solare, con conseguente aumento del calore immagazzinato dalle superfici urbanizzate.

Come il Rapporto di Copertura, anche la Densità edilizia è facilmente computabile se si dispone di informazioni circa l'altezza media dei fabbricati (ad esempio, cartografia 3D o rilievi LIDAR).

Rapporto di impermeabilizzazione (NPSR)

Il Rapporto di impermeabilizzazione, o *Non Permeable Surface Rate*, è il rapporto tra la superficie impermeabilizzata *NPS* nell'area *A* oggetto di analisi e l'area *A* stessa:

$$NPSR = \frac{NPS}{A} \left[\frac{m^2}{m^2} \right]$$

La superficie impermeabilizzata *NPS* rappresenta la somma delle superfici edificate e pavimentate, ed è solitamente utilizzata per esprimere il consumo di suolo.

La superficie impermeabilizzata è stata identificata come un importante indicatore ambientale (Arnold and Gibbons, 1996) e rappresenta una misura approssimata dell'impronta ecologica dell'uomo (Sutton et al., 2009).

L'aumento di superfici impermeabilizzate conduce ad un incremento della pericolosità del deflusso delle acque meteoriche le quali, non potendo infiltrarsi nel suolo, dilavano seguendo la pendenza del terreno. I suoli impermeabilizzati sono causa, da un lato, di una maggiore quantità di radiazione solare assorbita durante il giorno, a causa dei bassi coefficienti di albedo, e, dall'altro, di un Rapporto di Bowen $\beta > 1$, per cui l'energia è trasferita dal suolo all'atmosfera prevalentemente attraverso il flusso di calore sensibile. Il risultato è un aumento della temperatura dell'aria sovrastante e l'insorgere del fenomeno dell'UHI (cfr. Capitoli 4, 5).

Un recente studio sviluppato sulle città di Roma, Milano, Firenze e Bologna ha rilevato correlazioni statisticamente significative tra superfici impermeabilizzate e temperatura superficiale in diversi periodi dell'anno, più forti in estate rispetto all'inverno (Morabito et al., 2016).

L'impermeabilizzazione dei suoli può anche essere espressa con specifico riferimento ai soli spazi aperti, sottraendo alla superficie impermeabilizzata *NPS*, la superficie coperta *Sc*:

$$NPOS = NPS - Sc$$

Facendo, dunque, riferimento alla superficie impermeabilizzata degli spazi aperti *NPOS*, si calcola allo stesso modo il Rapporto di impermeabilizzazione degli spazi aperti, o *Non Permeable Open Space Ratio*:

$$NPOS R = \frac{NPOS}{A} \left[\frac{m^2}{m^2} \right]$$

Ulteriori indici descrittivi dell'ambiente costruito

Rapporto di visuale libera

Definito anche *Aspect Ratio*, il Rapporto di visuale libera (H/W), è il rapporto fra l'altezza di due cortine edilizie frontistanti H e la distanza che tra esse intercorre W . Tale parametro descrive la geometria di quello che è stato definito *canyon urbano* (cfr. Capitolo 5).

Se H/W è prossimo a 1, e non vi sono rilevanti aperture lungo le cortine edilizie, si è in presenza di un *canyon uniforme*. Se, invece, H/W risulta minore di 0,5, si parla di *canyon superficiale* (*shallow canyon*). Un *Aspect Ratio* H/W pari circa a 2 è indicativo di un *canyon profondo* (Figura 26).

Il *canyon urbano* può anche essere descritto con riferimento alla sua dimensione longitudinale L , e classificato a seconda del rapporto L/H in *canyon corto* ($L/H \cong 3$), *medio* ($L/H \cong 5$), e *lungo* ($L/H \cong 7$) (Shishegar, 2013).

Studi hanno dimostrato che la geometria e l'orientamento dei *canyon urbani* incidono sulla temperatura e il soleggiamento degli ambienti interni ed esterni e sulla permeabilità ai flussi dei venti locali, influenzando il *comfort* termico dell'*Urban Canopy Layer* così come il consumo di energia da parte degli insediamenti urbani (Ali-Toudert, Mayer, 2006; Shishegar, 2013) (Figura 27).

L'*Aspect Ratio* è stato anche utilizzato da Oke come variabile dipendente per descrivere l'intensità dell'UHI (cfr. Capitolo 5). Tuttavia, tale parametro, in analisi a larga scala, può presentare difficoltà computazionali dovute alla eterogeneità dei volumi edilizi. Una cortina edilizia, ad esempio, potrebbe non presentare la medesima altezza lungo tutta la lunghezza del *canyon*, così come fronti opposti potrebbero avere altezze sensibilmente differenti.

Sky-view factor

Un metodo alternativo all'*Aspect Ratio* per descrivere la geometria dei *canyon urbani* e per valutare l'entità e la portata dello scambio radiativo è la *frazione di cielo visibile*, o *sky-view factor* (SVF). Tale parametro esprime, in termini percentuali, il rapporto tra la radiazione ricevuta (o emessa) su una superficie piana e la radiazione emessa (o ricevuta) dall'intero emisfero radiante (Watson,

Johnson, 1987). Atteso il ruolo importante che esso assume nell'equazione del bilancio radiativo, lo SVF è stato uno strumento utilizzato principalmente da climatologi per studiare le relazioni tra la morfologia urbana e l'intensità notturna dell'UHI.

Lo SVF rappresenta la porzione di volta celeste che può essere osservata da un dato punto dell'area oggetto di analisi. Uno SVF molto elevato, al limite pari a 1, consente di presumere che il sito in esame si trovi in un'area priva di volumi, viceversa, un valore esiguo dello SVF ($0,20 \div 0,25$), è proprio di un'area urbana connotata da alti valori di Densità edilizia e Rapporto di copertura.

Lo SVF di un ambiente urbano viene comunemente determinato mediante quattro metodi differenti: metodi analitici, metodi fotografici, Sistemi di Posizionamento Globale (GPS) e tramite *software* specifici (Chen et al., 2010).

I metodi analitici fanno riferimento a semplificazioni di tipo geometrico e basano la stima dello SVF in relazione alle caratteristiche geometriche e al modello di scambio radiativo in un *canyon urbano*.

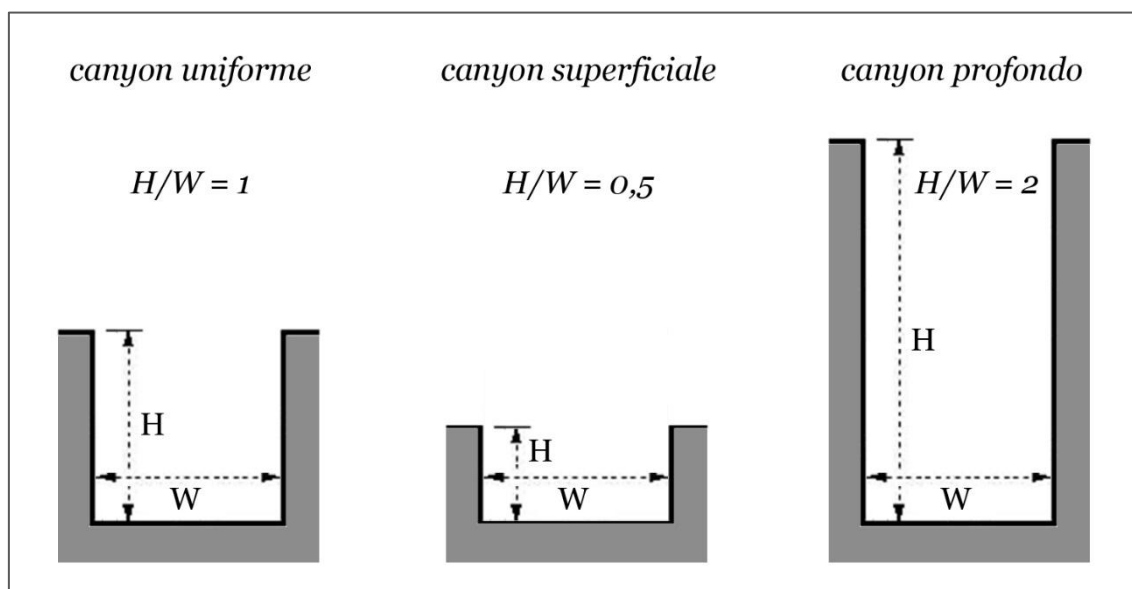


Figura 26 - Rappresentazione schematica delle tipologie di *canyon urbano*, classificate in base al valore dell'*Aspect Ratio* H/W .

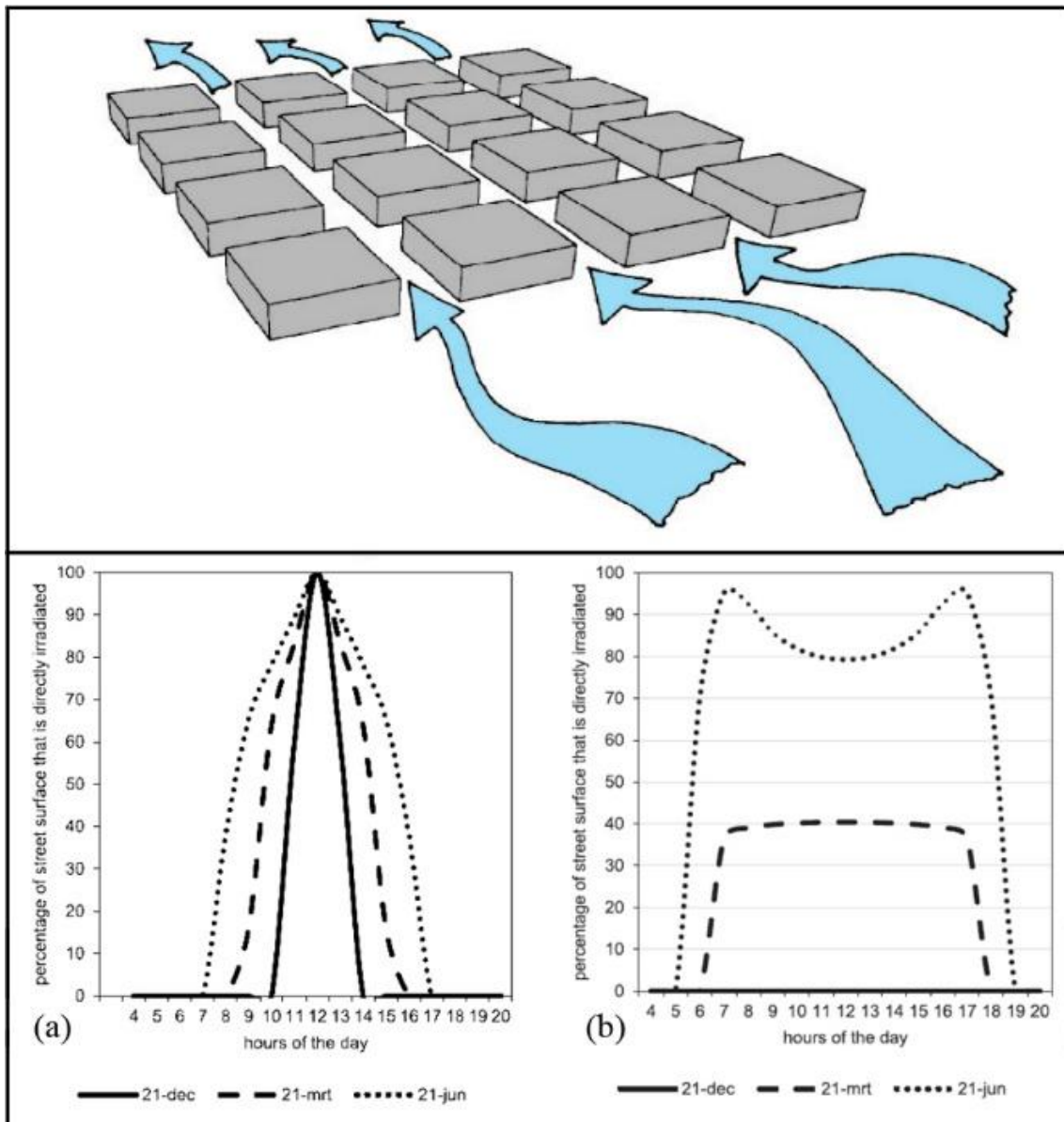


Figura 27 - In alto, rappresentazione schematica di come strade dritte e parallele ai venti prevalenti favoriscano la ventilazione naturale all'interno dei tessuti urbani (elaborazione su Santamouris et. al, 1999). In basso, impatto dell'orientamento delle strade sul soleggiamento: percentuale della superficie stradale direttamente colpita dalla radiazione solare incidente quando la strada è orientata lungo la direttrice N-S (a), e E-O (b) per un *canyon urbano* di 5 metri di larghezza (Robins, Macdonald, 1999).

La formulazione generale fornita da Johnson e Watson (1984) prevede il calcolo dello SVF analizzando la frazione del flusso radiativo che lascia un elemento della superficie analizzata e che raggiunge il cielo visibile:

$$\psi_{SKY} = \frac{1}{\pi R^2} \int_{S_v} \cos \Phi \, dS$$

dove

S_v è la superficie che rappresenta la porzione di cielo visibile;

Φ è l'angolo formato da S_v con lo Zenith;

R è il raggio dell'emisfero radiante.

Oke, invece, stimò SVF per una parete utilizzando la semplificazione di un *canyon urbano* di lunghezza infinita, di altezza H e la larghezza W , con $W = 2D$. In tali condizioni, lo SVF di un punto posto nel mezzo del *canyon* è stato definito come:

$$\psi_{sky} = \cos \beta$$

dove

β è l'angolo di inclinazione della parete dato da $\beta = \tan^{-1}(H/D)$.

Ciò suggerisce che lo SVF, per *canyon* di forma regolare, sia approssimabile all'*Aspect Ratio* H/W (Oke, 1981).

Nella realtà, gli edifici che costituiscono un *canyon urbano* sono sempre di forma asimmetrica e di dimensione finita e ciò spinse Johnson e Watson a perfezionare le formulazioni precedenti, definendo il fattore di vista di un muro ψ_w . Esso è definito utilizzando gli angoli azimutali γ_1, γ_2 , misurati dall'elemento oggetto di studio di superficie ΔA e le estremità della parete del muro, e l'angolo di elevazione β (Johnson, Watson 1984):

$$\psi_w = \frac{1}{2\pi} \{(\gamma_1 - \gamma_2) + \cos \beta [\tan^{-1}(\cos \beta \tan \gamma_1) - \tan^{-1}(\cos \beta \tan \gamma_2)]\}$$

In questo modo ψ_{sky} è dato da:

$$\psi_{sky} = 1 - \sum_{i=1}^n \psi_w(i)$$

dove n rappresenta il numero di edifici che circondano ΔA (Figura 28).

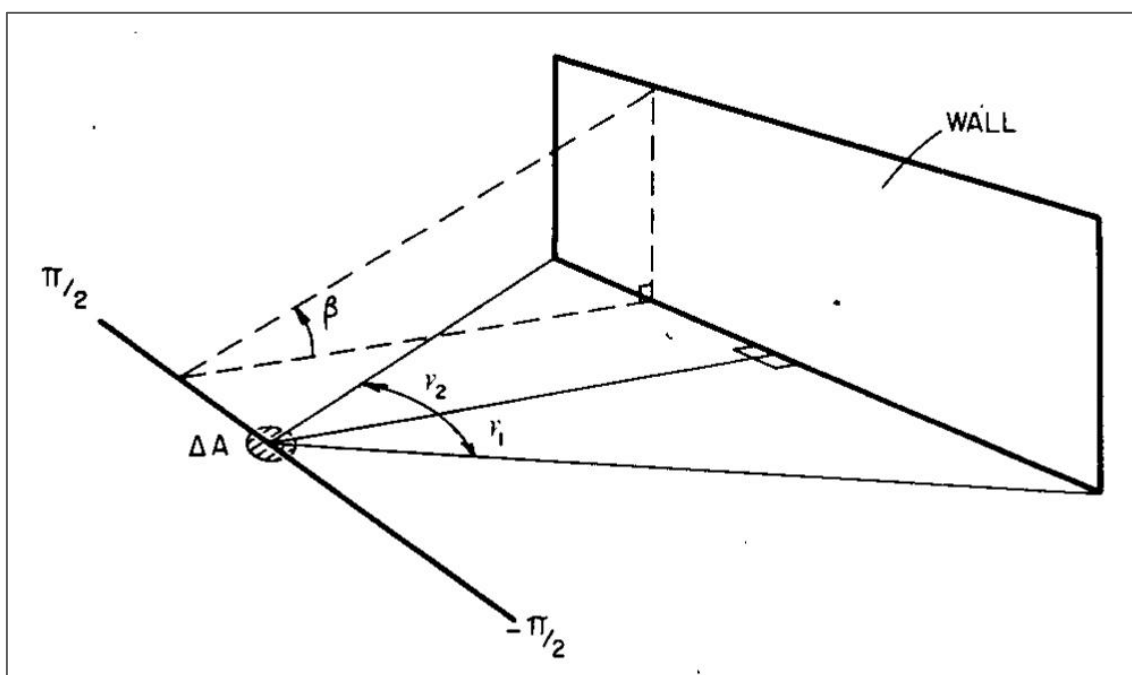


Figura 28 - Modello per lo scambio radiativo tra un elemento oggetto di studio di superficie ΔA e un muro di lunghezza finita (Johnson, Watson 1984).

I metodi analitici forniscono un *framework* teorico per determinare lo SVF per un particolare punto in differenti strutture urbane. Sono adatti per strutture semplici e ben definite e possono essere utilizzati per verifiche degli algoritmi e analisi parametriche (Chen et al., 2010).

I metodi fotografici utilizzano *fish-eye*¹¹ per acquisire direttamente in situ fotografie in grado di proiettare l'ambiente emisferico su un piano di forma circolare. Le fotografie sono poi elaborate (conversione delle immagini in scala di grigio, alterazione della luminosità e del contrasto, etc.) per definire lo *skyline*. La relazione tra le parti ostruite (e non) del cielo viene in seguito calcolata attraverso trasformazioni specifiche.

Anderson (1964) è stato probabilmente il primo ad affrontare la questione del *fattore di vista* attraverso un approccio di tipo fotografico calcolando e stimando la distribuzione della luce del sole nei suoi studi personali riguardanti intere aree verdi (foreste, boschi), ma è solo a partire dagli anni '80 che i metodi

¹¹ Trattasi di un obiettivo fotografico grandangolare estremo che abbraccia un angolo di campo non inferiore a 180°.

fotografici sono stati impiegati per determinare lo SVF nello studio del microclima urbano (Chen et al., 2010).

Il metodo fotografico si adatta particolarmente per determinare lo SVF in casi reali, in quanto è in grado di tener conto delle forme irregolari degli edifici che costituiscono un tessuto urbano. Inoltre, dal momento che nelle aree urbane sono presenti non solo edifici ma anche alberi, il metodo fotografico consente di ottenere uno SVF più preciso rispetto ai semplici modelli analitici. Tuttavia, tale metodo risulta più oneroso in termini di tempo da dedicare sia allo scatto che all'elaborazione delle immagini. Le opportunità di rilevamento, tuttavia, sono dipendenti dalle condizioni meteorologiche; una luce solare diretta o una nuvolosità irregolare, infatti, possono causare problemi nell'acquisizione delle immagini. Dette limitazioni rendono i metodi fotografici non idonei per l'analisi dello SVF in zone di grande estensione (Chen et al., 2010).

Il metodo GPS è stato sviluppato con l'obiettivo di misurare lo SVF in tempo reale (Chapman et al., 2002). Un ricevitore GPS viene utilizzato per acquisire i primi dati dal satellite di riferimento. Il metodo è stato implementato per ottenere buoni risultati in ambienti urbani, ma ha evidenziato una efficacia ridotta in aree suburbane e rurali, dal momento che la variazione della copertura arborea determina un disturbo nell'elaborazione del segnale.

I metodi *software*, infine, sono sviluppati per simulare il valore di SVF in una realtà virtuale ricostruita in ambiente GIS. Essi si dividono in metodi *vettoriali* e *raster*, a seconda del tipo di database utilizzato.

I metodi vettoriali semplificano gli edifici come blocchi a copertura piana rappresentati da poligoni. L'ambiente emisferico radiante è suddiviso in porzioni omogenee da un angolo di rotazione. All'interno di un particolare angolo di rotazione α il *software* cerca il singolo edificio con il maggiore angolo di elevazione β all'interno della direzione esaminata. La frazione di cielo ostruita da tale edificio è dunque calcolata applicando un metodo analitico e lo SVF è ottenuto come complementare a 1 somma di tutte le frazioni di cielo ostruite calcolate per tutte le direzioni. La precisione di tale metodo dipende dall'angolo di rotazione e dal raggio entro cui è effettuata la ricerca dell'edificio più alto: angoli di rotazione più piccoli e un raggio più grande assicurano una stima di SVF maggiormente accurata.

Il metodo *raster* utilizza invece un DEM e risulta significativamente più rapido del metodo *vettoriale*. L'accuratezza della stima è direttamente proporzionale alla risoluzione dell'immagine *raster* utilizzata dal *software*.

Si cita, a titolo di esempio, la procedura di calcolo del *software Relief visualization tool*, utilizzato nell'applicazione di cui alla Parte IV. Tale *software* analizza un DEM in formato *raster*, ricercando il *pixel* con il massimo valore entro un certo raggio prestabilito e calcola la frazione di cielo ostruito come $\sin \gamma$ dove γ è l'angolo di elevazione del *pixel* trovato. SVF è computato, dunque, come complementare a 1 della media della frazione di cielo ostruito calcolato in un certo numero di direzioni n (Zakšek et al., 2011) (Figura 29).

Frontal Area Density

L'intensità media del vento è funzione della *lunghezza di rugosità aerodinamica* z_0 , a sua volta dipendente dalle caratteristiche della superficie, e dalla *distanza di spostamento* z_d , dipendente, invece, dall'altezza media degli edifici e dalla loro densità (cfr. Capitolo 4).

La stima di tali parametri richiede spesso modelli aerodinamici a larga scala. Sia modelli fisici (galleria del vento) che modelli di simulazione numerici sono solitamente impiegati per fornire informazioni riguardanti i flussi di vento che spirano nell'*Urban Canopy Layer*.

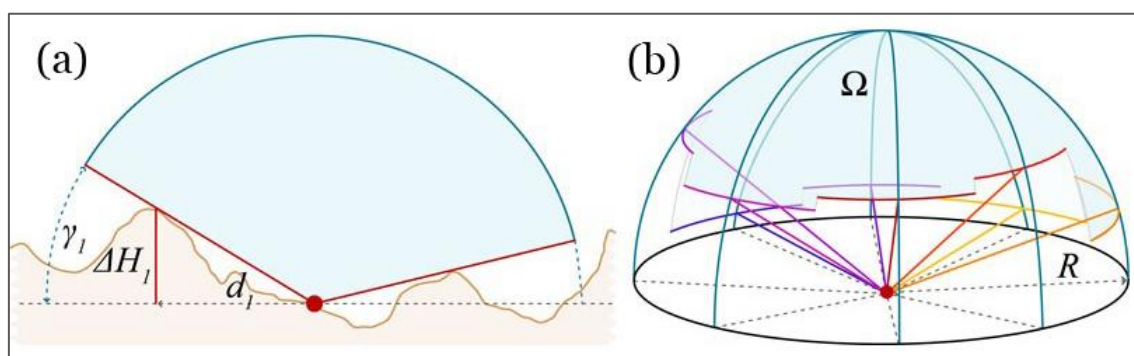


Figura 29 - Rappresentazione schematica dello SVF, definito come la parte del cielo visibile Ω al di sopra di un certo punto di osservazione, come mostrato nella rappresentazione bidimensionale (a). L'algoritmo del *software Relief visualization tool* computa l'angolo di elevazione γ in n direzioni (8 in figura) entro un prestabilito raggio R (b) (Zakšek et al., 2011).

Tuttavia, implementare e verificare modelli di questo tipo per applicazioni nel campo dell'urbanistica può risultare dispendioso; pertanto, si è soliti impiegare metodi cosiddetti *morfologici* per modellare la rugosità della superficie urbanizzata e valutare la permeabilità dei tessuti urbani ai flussi di vento (Yuan, 2015).

La *Frontal Area Density* (FAD) è una misura dell'area frontale per unità di area orizzontale e per unità di incremento di altezza, ed è stata largamente utilizzata in ambito scientifico come supporto per la quantificazione della resistenza aerodinamica in funzione dell'altezza degli edifici (Chen, Ng, 2011).

La *FAD*, secondo la formulazione di Burian, è esprimibile come:

$$a_{f(z,\theta)} = \frac{A(\theta)_{proj}(\Delta z)}{A\Delta z}$$

dove

$A(\theta)_{proj}(\Delta z)$ è l'area delle facciate degli edifici proiettate nel piano normale alla direzione del vento per uno specifico differenziale di altezza Δz ;

θ è l'angolo di direzione del vento

A è l'area dell'ambito spaziale oggetto di studio;

Per una specifica direzione del vento θ , integrando $a_{f(z,\theta)}$ su tutta l'altezza dell'*Urban Canopy Layer* z_H si ottiene la *Frontal Area Index* (FAI), λ_f (Burian et al., 2002):

$$\lambda_f = \int_0^{z_H} a_{f(z,\theta)} \Delta z = \frac{A(\theta)_{proj}}{A}$$

Al fine di calcolare la permeabilità urbana, si valuta la FAD media annuale considerando n direzioni dei venti prevalenti e le rispettive frequenze in termini percentuali (Yuan, 2015):

$$a_{f(z)} = \sum_{i=1}^n a_{f(z,\theta)} \cdot P_{(\theta_i)}$$

dove

$a_{f(z)}$ è la FAD media annuale;

$P_{(\theta,i)}$ è la frequenza annuale del vento nella i -esima direzione del vento θ_i .

Tale parametro, tuttavia, per essere computato, necessita del dato della frequenza della distribuzione dei flussi di vento per l'area in esame.

Alcuni autori hanno utilizzato la FAD media annuale come misura della permeabilità urbana (Yuan, 2015).

In altri casi, la FAI, λ_f è intesa come parametro di input per il calcolo della *lunghezza di rugosità aerodinamica* z_0 , secondo la formulazione seguente (Bottema e Mestayer, 1998):

$$z_0 = (MH - z_d) \exp\left(-\frac{k}{\sqrt{0,5 \cdot C_{Dh} \cdot \lambda_f}}\right)$$

dove

MH è l'altezza media degli edifici nell'area analizzata;

k è la costante di von Karman (0,40);

C_{Dh} è il coefficiente di resistenza aerodinamica di un ostacolo isolato (0,8);

λ_f è la FAI.

La distanza di scostamento z_d è anch'essa funzione di parametri morfologici. Bottema e Mestayer, per gruppi di edifici irregolari, ne propongono la stima attraverso la formulazione:

$$z_d = MH \cdot (\lambda_p)^{0,6}$$

Il parametro λ_p , definito *Plan Area Density* (PAI), o *densità planare*, non è altro che il Rapporto di copertura, LCR dell'area analizzata (Figura 30).

Rapporto di forma

La forma o la tipologia generale degli edifici è definita da tutti i componenti dell'involucro edilizio che separano gli spazi chiusi dall'ambiente esterno.

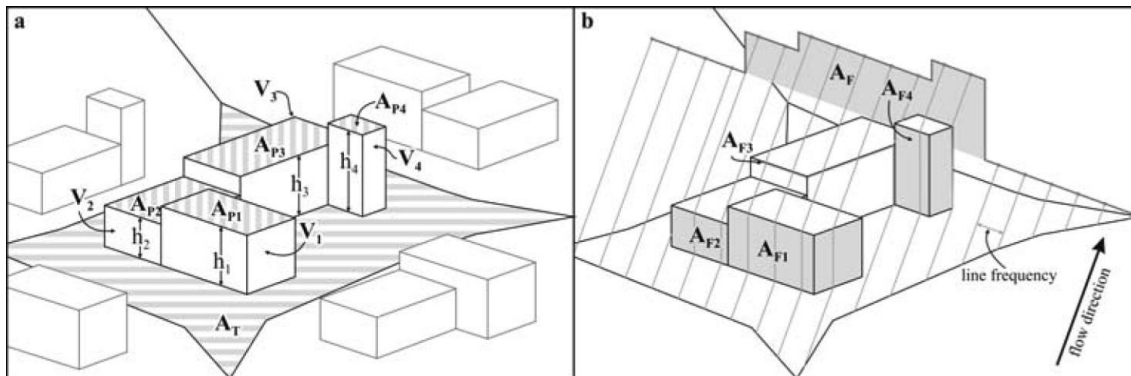


Figura 30 - Rappresentazione schematica dei parametri necessari per calcolare la PAI λ_p (a), e la FAI λ_f (b) (Gál, Sümegehy, 2007).

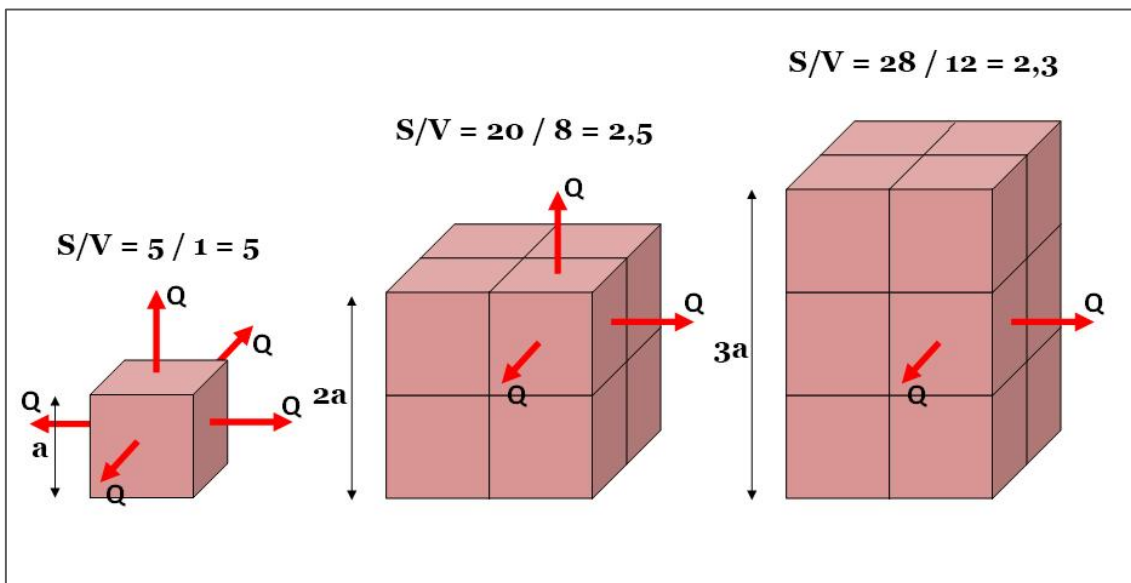


Figura 31 - Variazione del Rapporto di forma S/V al variare delle dimensioni e della forma di un edificio.

Minore è, a parità di volume, la sua superficie esposta all'esterno, più un edificio è compatto, e migliori saranno le sue prestazioni dal punto di vista energetico per due ordini di motivi:

- 1) al crescere della superficie esposta crescono le dispersioni di energia verso l'esterno in inverno e i guadagni indesiderati in estate;
- 2) al crescere del volume crescono la massa e l'energia che essa può accumulare, contribuendo a smorzare le oscillazioni termiche.

Il *Rapporto di forma* (S/V), dunque, definito come rapporto tra la superficie disperdente S e il volume dell'edificio V , è un parametro morfologico capace di descrivere le caratteristiche termiche dell'edificio stesso.

A parità di volume, il fabbisogno energetico di un edificio decresce progressivamente con il decrescere della superficie disperdente. Dal punto di vista energetico, dunque, sono preferibili valori limitati di tale rapporto, ottenibili mediante l'impiego di forme regolari e compatte e, a parità di forma, prediligendo volumi maggiori (Figura 31).

Parametri descrittivi del verde urbano

Percentuale di aree verdi (GAR)

La Percentuale di aree verdi, o *Green Area Ratio*, è calcolata come rapporto tra la superficie destinata a verde urbano nell'area A oggetto di analisi e l'area A stessa:

$$GAR = \frac{GA}{A} \left[\frac{m^2}{m^2} \right]$$

Le superfici destinate a verde all'interno di un ambito urbano sono, solitamente, costituite da ambiti spaziali definiti in cui sono presenti zone alberate, prati e campi di gioco ma anche viabilità di accesso, percorsi pedonali e altre superfici che potrebbero non essere permeabili. Per distinguere le aree coperte da vegetazione dal resto delle superfici di un ambito analizzato, è necessario, pertanto, ricorrere ad un ulteriore parametro, il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

Normalized Difference Vegetation Index

Il NDVI è un indicatore grafico impiegato per analizzare immagini telerilevate e valutare se la zona osservata contiene della vegetazione viva.

Le cellule delle foglie riflettono e trasmettono la radiazione solare nel vicino infrarosso della regione spettrale poiché il livello di energia in quel dominio non è abbastanza alto da consentire di sintetizzare molecole organiche. Un forte

assorbimento a queste lunghezze d'onda potrebbe solamente provocare il surriscaldamento della pianta ed eventualmente danneggiarne i tessuti.

Dunque, il pigmento delle foglie, la clorofilla, assorbe fortemente la luce visibile (da 0,4 a 0,7 μm) per l'utilizzo nella fotosintesi. Al contempo, la struttura cellulare delle foglie riflette fortemente la luce nel vicino infrarosso (da 0,7 a 1,1 μm).

Il NDVI, dunque, è un parametro che sfrutta le forti differenze di riflettanza delle piante per determinare la loro distribuzione spaziale nelle immagini satellitari. Esso è calcolato come di seguito:

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS}$$

dove *VIS* e *NIR* stanno rispettivamente per le misure di riflettanza spettrale acquisite nella regione visibile (rosso) e nel vicino infrarosso. Tali grandezze sono esse stesse rapporti della radiazione riflessa su quella entrante per ogni banda spettrale, e di conseguenza assumono valori compresi tra 0 e 1.

In base alla definizione, lo stesso NDVI varia, quindi, tra -1 e +1.

In generale, se vi è molta più radiazione riflessa nel vicino infrarosso rispetto a quella nelle lunghezze d'onda visibili, allora è probabile che la vegetazione presente in quel *pixel* sia maggiormente densa (ad esempio, un bosco). In tal caso, il NDVI tenderà a dare valori positivi (0,3÷0,8), mentre nel caso di nuvole e di neve sarà caratterizzato da valori negativi (Tabella 7).

Tabella 7 - Valori tipici di NDVI per vari tipi di copertura (Holben et al., 1986).

Tipo di copertura	NDVI
Vegetazione densa	0,7
Suolo nudo e asciutto	0,025
Nuvole	0,002
Neve e ghiaccio	-0,046
Acqua	-0,257

Il NDVI è un buon indicatore non solo per stimare la presenza di vegetazione e, dunque, della capacità di attenuare l'incremento di temperatura nelle aree urbane, ma anche per determinare la *lunghezza di rugosità aerodinamica* z_0 , secondo la formulazione seguente (Gupta et al., 2002):

$$z_0 = \exp(-5,5 + 5,8NDVI)$$

Leaf Area Index

L'indice di area fogliare o *Leaf Area Index* (LAI), parametro utilizzato in ambito forestale e definito come metà dell'area di intercettazione delle foglie per unità di superficie (Chen, Black, 1992). Il LAI, da un punto di vista dimensionale, è espresso in metri quadrati di fogliame su metro quadro di suolo (m^2/m^2) (Figura 32).

Il LAI dipende da alcuni fattori quali la composizione specifica, la fase di sviluppo del bosco, le condizioni del sito in cui si misura, il metodo tramite il quale viene misurato. Esso è calcolabile con metodi diretti, molto dispendiosi, o metodi indiretti, tramite funzioni allometriche o procedimenti ottici. Altro svantaggio del LAI è la sua estrema variabilità, tale per cui in primavera ed in autunno esso può cambiare anche giorno per giorno.

Orientativamente, i valori di LAI variano da 0 (suolo nudo) a oltre 10 (densa foresta di conifere)

Maggiore è il LAI, maggiore la quota di radiazione intercettata, minore quella che arriva al terreno. Il LAI, inoltre, può fornire informazioni sulla capacità di immagazzinamento di CO₂ delle piante.

Altezza media delle aree verdi

La copertura vegetale determina un minore trasferimento di calore dal suolo all'atmosfera e, allo stesso tempo, nel caso di alberi, un più contenuto apporto di radiazione solare incidente, poiché essa viene in parte schermata dalla chioma delle piante.

Alberi alti e con una chioma ampia potranno garantire un'ombra al suolo più grande e, pertanto, un effetto benefico sulla temperatura delle superfici e dell'aria.

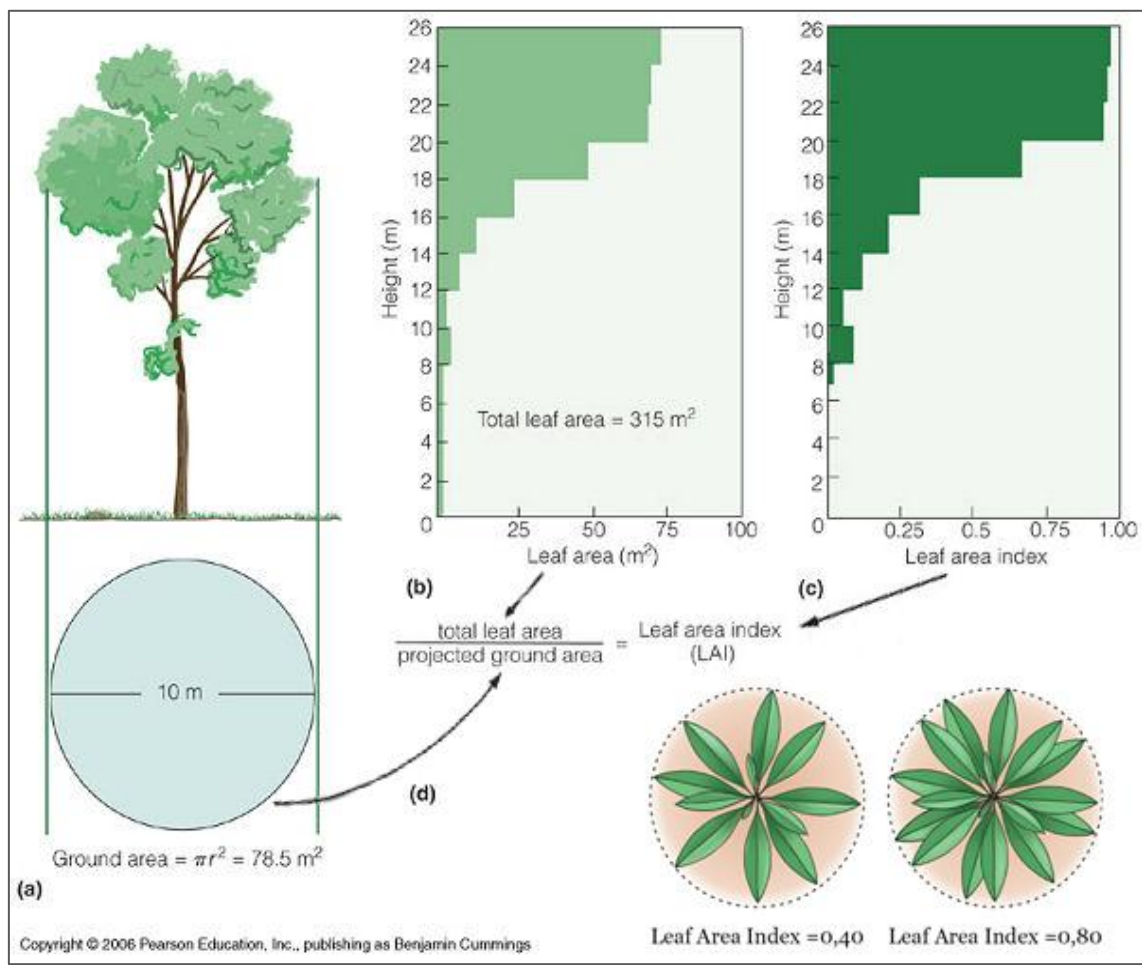


Figura 32 - Rappresentazione schematica del calcolo del LAI (Campbell, Reece, 2008).

Attesa la difficoltà nel calcolo del LAI, si può ricorrere ad un indicatore sostitutivo, che descriva l'altezza media delle aree vegetate, o *Green Areas Mean Height* (GAMH).

Disponendo di un DEM e della mappa del NDVI dell'area oggetto di studio, il GAMH è computabile come la media dei valori dei *pixel* del DEM corrispondenti alle aree vegetate evidenziate dal NDVI.

Metriche di Landscape Ecology

La caratterizzazione del verde urbano, come evincibile anche dalla descrizione degli indicatori appena citati, è solitamente affidata a parametri che si limitano a quantificarne le dimensioni, i rapporti con l'ambito analizzato, o le superfici destinate agli abitanti insediati.

Tuttavia, per ciò che concerne l'influenza che gli spazi verdi esercitano sul clima, non è sufficiente ragionare meramente in termini quantitativi. Infatti, la distribuzione e la configurazione degli spazi verdi all'interno del tessuto urbanizzato, rappresenta un aspetto non trascurabile se si vuole comprendere il ruolo benefico che le aree verdi ricoprono nella mitigazione degli effetti negativi che l'urbanizzazione ha sul *comfort* termico della città.

È necessario, dunque, considerare metodi di misura dei *pattern* spaziali di determinati usi dei suoli. A tal riguardo, una delle tecniche più utilizzate è il calcolo di metriche afferenti al *framework* teorico della *Landscape Ecology*.

La *Landscape Ecology* è una materia che integra i principi dell'ecologia e della geografia fisica nella comprensione delle dinamiche e delle distribuzioni spaziali degli elementi nel paesaggio (Forman, Godron, 1986).

Gli elementi di base della struttura del paesaggio sono le macchie di ecosistemi, dette *patch*, la cui definizione può variare soprattutto in relazione al contesto in cui viene condotto lo studio. Nel caso di analisi analoghe a quelle condotte nel presente lavoro di ricerca, la definizione più appropriata è quella secondo cui il termine *patch* individua un aggregato di *pixel* adiacenti (considerando gli 8 vicini di un *pixel* di riferimento) appartenenti ad una stessa tipologia, definita a sua volta *classe*, o *class* (Riitters et al., 1995).

Le variazioni di configurazione e composizione degli elementi del paesaggio possono indicare, se correttamente interpretate, l'evoluzione dell'ecosistema in quanto la struttura del paesaggio influenza ed è influenzata dai processi che modellano il territorio (Forman, Godron, 1986).

Per descrivere quantitativamente la struttura del paesaggio sono state sviluppate numerose metriche, dette appunto *metriche di paesaggio*, o *Landscape metrics* (LSM) che definiscono una misura del paesaggio, calcolata da cartografia o da dati telerilevati, con la quale si descrive la struttura spaziale del territorio o della copertura del suolo. Le metriche operano sia sulle singole *patch*, sia a livello di *class*, sia, infine, sulla scena considerata nel suo complesso (*landscape level*).

Esistono due categorie generali di metriche: *metriche di composizione* e di *configurazione spaziale* (Gustafson, 1998). Le prime non richiedono informazioni sulla localizzazione. Ne sono esempi il valore medio, la mediana e

valori di eterogeneità interna (ad esempio, varianza, deviazione standard), che descrivono, dunque, la presenza, l'abbondanza relativa e la diversità di tipologie di paesaggio. Le metriche di configurazione, al contrario, si riferiscono alle caratteristiche della distribuzione spaziale e alla forma delle *patch*.

All'interno di queste due macro-categorie esiste una vastissima possibilità di scelta. Le misure di base che si possono effettuare sulle *patch*, dalle quali si sviluppano la maggior parte delle LSM, sono riassumibili in tre principali:

- a) definizione della classe di appartenenza;
- b) definizione dell'area e del perimetro;
- c) individuazione delle classi confinanti.

Ne consegue che gran parte delle LSM siano, quindi, correlate tra loro, misurando aspetti simili o identici del mosaico del paesaggio. In molti casi, diverse LSM possono essere ridondanti non perché misurano lo stesso aspetto ma perché, per il particolare paesaggio studiato, diversi elementi della struttura sono tra loro correlati e dipendenti. Studi hanno dimostrato come un numero limitato di metriche possa catturare i principali *pattern* di variabilità di un *dataset*, individuando cinque metriche confrontabili e poco ridondanti (Riitters et al., 1995). Tali metriche, tuttavia, non si possono ritenere essenziali nello studio di ogni paesaggio, poiché la scelta delle LSM deve riflettere esplicitamente alcune ipotesi specifiche riguardo il paesaggio osservato ed i processi che lo determinano.

Le LSM possono essere calcolate attraverso *software* GIS, attraverso cui memorizzare, analizzare, sovrapporre e visualizzare dati georeferenziati. I *software* più diffusi generalmente permettono il calcolo della dimensione media delle *patch*, della distribuzione delle classi di copertura e del rapporto area/perimetro.

Per determinare i valori di metriche di configurazione più complesse si utilizzano *software* specifici. Tra i molti disponibili, quello maggiormente in uso è FRAGSTAT, *software open-access*, sviluppato dal Laboratorio di Ecologia del Paesaggio dell'Università del Massachusetts Amherst (McGarigal, Marks, 1995). FRAGSTATS, giunto alla versione 4.2, è un *software* libero, di facile comprensione e in grado di operare con immagini ad 8 bit, nonché con dati espressi in formato ASCII. FRAGSTATS, molto utilizzato negli studi di

landscape ecology, fornisce una vasta gamma di metriche in grado di soddisfare esigenze anche molto diverse tra loro.

Le LSM in FRAGSTATS sono genericamente raggruppate in base all'aspetto del paesaggio misurato. Si badi che detti raggruppamenti sono eseguiti solo per convenienza e non esistono aspetti totalmente indipendenti l'uno dall'altro: una metrica può, infatti, appartenere a più di un gruppo.

La classificazione delle LSM in FRAGSTATS è la seguente:

- *Area/density/edge metrics*, metriche che riguardano la dimensione della *patch* e del suo perimetro;
- *Shape metrics*, metriche che definiscono la forma delle *patch*, a livello di singola *patch*, di *class* e di *landscape*; gran parte di tali metriche sono basate sul rapporto area-perimetro;
- *Core area metrics*, determinano l'area all'interno di una *patch* ad una fissata distanza dal suo contorno;
- *Isolation/proximity metrics*, calcolano diversi parametri basati sulla distanza tra le *patch*;
- *Contrast metrics*, metriche basate sulla quantità di differenze tra tipi di *patch* adiacenti ed appartenenti a diverse *class*;
- *Contagion/interspersions metrics*, metriche basate sulla tendenza delle *patch* ad esser spazialmente aggregate;
- *Connectivity metrics*, metriche che quantificano la connettività, cioè il grado con cui un paesaggio facilita o impedisce i flussi ecologici;
- *Diversity metrics*, metriche calcolate solo a livello di *landscape* che quantificano la composizione del paesaggio e non sono condizionate da una diversa disposizione delle *patch*.

Ad eccezione delle *diversity metrics* tutte le altre tipologie sono calcolate in FRAGSTATS sia a livello di *landscape* (48 metriche) sia di *classe* (43 metriche) che di singola *patch* (19 metriche). Con FRAGSTATS, inoltre, le metriche al livello *patch* possono essere sintetizzate al livello *class* o *landscape*, attraverso alcune funzioni statistiche quali media, media pesata sull'area, mediana, campo di variazione, deviazione standard e coefficiente di variazione.

Le metriche calcolate a livello *patch* quantificano le caratteristiche delle *patch*, come dimensione, forma e restituiscono un unico valore per ogni singola *patch*.

Esse costituiscono la base per il calcolo delle caratteristiche di una *class* di *patch* ma possono rappresentare, talvolta, anche dati interessanti per l'analisi del paesaggio (ad esempio, l'individuazione della *patch* con superficie maggiore).

Le metriche calcolate a livello *class*, invece, quantificano le caratteristiche di una stessa tipologia di *patch* come, ad esempio, la superficie totale, la dimensione media delle patch, il grado di aggregazione, e restituiscono un unico valore per la *class* analizzata. La maggior parte delle metriche di *class* possono essere interpretate come indici di frammentazione poiché misurano la configurazione di un certo tipo di *patch*. Per tale motivo, esse sono, in molte applicazioni, le principali LSM utilizzate (Botequilha Leitão, 2006). Come precedentemente ricordato, molte delle metriche al livello *class* sono derivate dalle metriche al livello *patch* sommando o mediando le *patch* della *class* corrispondente. La deviazione standard di una metrica, ad esempio, consente di individuare la dispersione dei valori della metrica stessa attorno alla sua media, fornendo informazioni sulla minore o maggiore diversità dell'aspetto analizzato nelle *patch* presenti in un'area.

Le metriche calcolate al livello *landscape*, infine, quantificano le caratteristiche dell'intero mosaico di *patch* come, ad esempio, la diversità tra tipi di *patch* o il valor medio della *patch*, e restituiscono un unico valore per il *landscape*. Esse caratterizzano la complessiva composizione e configurazione delle patch del mosaico senza riferimenti alle *patch* o alle *class*. La maggior parte delle metriche al livello *landscape* possono essere in generale interpretate come indici di eterogeneità poiché misurano complessivamente l'assetto del paesaggio. Analogamente a quanto avviene per le metriche di *class*, molte delle metriche al livello *landscape* sono derivate dalle metriche al livello *patch* e *class*, sommando o mediando le *patch* e le *class* che compongono il mosaico.

L'analisi della configurazione degli spazi verdi all'interno di un tessuto edificato attraverso LSM è stata già oggetto di alcuni studi applicativi (Li et al., 2011, Li et al., 2015).

Di seguito sono illustrate alcune delle più comuni LSM, calcolabili a livello *class* in FRAGSTATS, attraverso cui analizzare la configurazione di una particolare tipologia di uso del suolo all'interno di una determinata area esaminata.

AREA & EDGE METRICS

Patch Area (AREA), non è altro che l'area di ciascuna *patch* [m], appartenente a una determinata *class*, sintetizzata al livello *class* utilizzando le funzioni statistiche disponibili.

Patch radius of gyration (GYRATE), esprime l'estensione di ciascuna *patch* [m]; in altre parole, misura quanto lontano una *patch* si estende all'interno del *landscape* oggetto di esame, e si calcola come distanza media tra le celle di una *patch*. A parità di altri parametri, più grande è una *patch* maggiore sarà il relativo GYRATE. Può essere ricondotto al livello di *class*, utilizzando le funzioni statistiche disponibili.

Largest patch index (LPI), esprime la consistenza percentuale della più estesa area di ciascuna *class*. L'indice è dato da:

$$LPI = \frac{\max_j(a_{ij})}{A} \cdot 100$$

dove

a_{ij} è l'area della j -sima *patch* della *class* i ;

A è l'area del *landscape*.

Total edge (TE), esprime, al livello *class*, una misura assoluta della lunghezza del perimetro delle *patch* appartenenti ad una stessa *class*.

Edge Density (ED), con il termine *edge* si indica il confine tra due classi differenti; ED [m/ha] è pari alla somma di tutti i perimetri di una data *class*, considerando anche i confini del paesaggio, divisa per l'area totale indagata, espressa in ettari:

$$ED = \frac{\sum_{j=1}^n e_{ij}}{A} \cdot 10000$$

dove

e_{ij} è la lunghezza totale [m] del bordo della j -sima *patch* della *class* i ,

A è l'area del *landscape* [ha].

ED è un'espressione della forma e della complessità delle *patch* di una *class*, nonché dell'eterogeneità del mosaico che costituisce la scena. Può assumere qualunque valore maggiore o uguale a zero (Figura 33).

SHAPE METRICS

Perimeter-area ratio (PARA), esprime il semplice rapporto perimetro diviso area per ogni singola *patch*. Mantenendo la forma costante, un incremento nella dimensione della *patch* causerebbe un decremento di tale metrica. Può essere ricondotto al livello di *class*, utilizzando le funzioni statistiche disponibili.

Fractal dimension index (FRAC), misura il grado di irregolarità dell'oggetto esaminato. La geometria frattale, considerando oltre alle quattro dimensioni note (0=punto, 1=linea, 2=superficie, 3=volume) anche tutte le possibili situazioni intermedie, permette di valutare se e quanto la forma delle *patch* componenti il paesaggio, sia più 'vicina' a una dimensione euclidea (maggiore grado di eterogeneità o naturalità) o alla dimensione lineare. Per tale ragione, FRAC è utilizzato anche come indice di naturalità, ovvero per individuare *patch* non modificate dall'attività antropica (che solitamente tende a generare forme geometriche semplici).

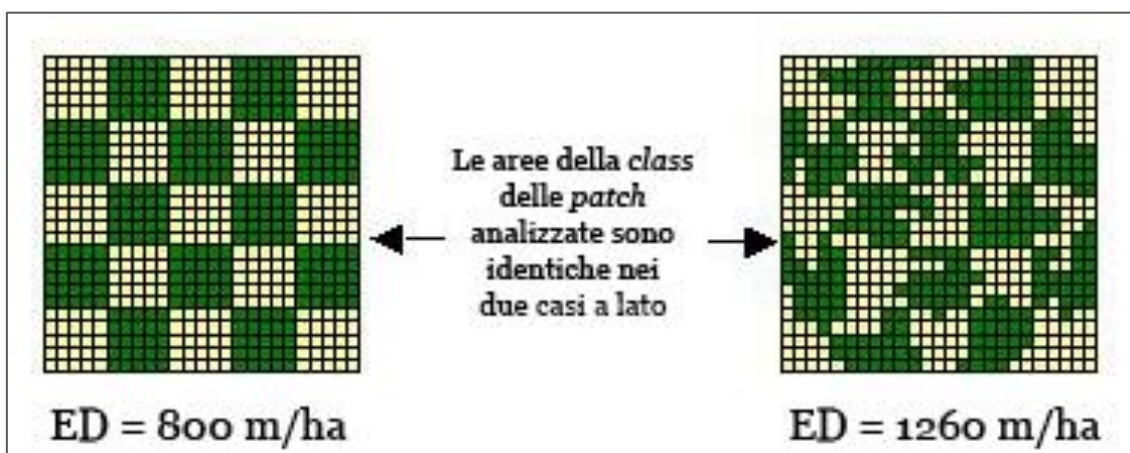


Figura 33 – Crescita del valore di ED con l'aumentare della complessità delle *patch* presenti nell'area oggetto di esame.

Il vantaggio dell'analisi frattale risiede nel fatto che è applicabile, nello studio della configurazione spaziale, ad un'ampia varietà di scale perché presenta la proprietà di *invarianza di scala*. Può essere ricondotto al livello di *class*, utilizzando le funzioni statistiche disponibili.

Perimeter-area fractal dimension (PARAFRACT), simile al precedente ma applicato al livello di *class* o di *landscape*, utilizzando la relazione tra l'area A e il perimetro P :

$$A = k \cdot P^{(2/D)}$$

dove

k è una costante;

D è la dimensione frattale.

Poiché, per il calcolo di tale indice, il *software* impiega analisi di regressione lineare, PARAFRACT restituisce, talvolta, per aree molto piccole, risultati falsati in presenza.

Related circumscribing circle (CIRCLE), è espressione del rapporto tra l'area di una *patch* e il più piccolo cerchio circoscritto. Esso consente di effettuare una valutazione di una *patch*, appartenente ad una certa *class* fornendo una misura dell'allungamento della *patch*. A parità di area, una *patch* con un basso valore di CIRCLE, presenterà una forma più allungata. Può essere ricondotto al livello di *class*, utilizzando le funzioni statistiche disponibili.

CORE AREA METRICS

Core area (CORE), rappresenta l'area all'interno di una *patch* calcolata eliminando da essa la superficie compresa entro una certa distanza dal perimetro della *patch*, detta *edge-depth*. Può essere ricondotto al livello di *class*, utilizzando le funzioni statistiche disponibili.

CORE è una misura dipendente da forma, superficie ed *edge-depth*.

Mantenute costanti superficie ed *edge-depth*, all'aumentare della complessità della forma, diminuisce il CORE. Analogamente, mantenute costanti forma ed

edge-depth, all'aumentare della superficie, aumenta il CORE. In ultimo, a parità di forma e superficie, aumentando *edge-depth* diminuisce CORE (Figura 34).

ISOLATION METRICS

Euclidean nearest neighbor distance (ENN), esprime la più breve distanza in linea d'aria [*m*] tra una *patch* e la *patch* più vicina della stessa *class*. Può essere ricondotto al livello di *class*, utilizzando le funzioni statistiche disponibili.

Connectance index (CONNECT), è dato dal numero di *join* funzionali tra *patch* di una stessa *class*. Esso rappresenta la percentuale di tutte le possibili connessioni tra le *patch*, entro una distanza soglia fissata.

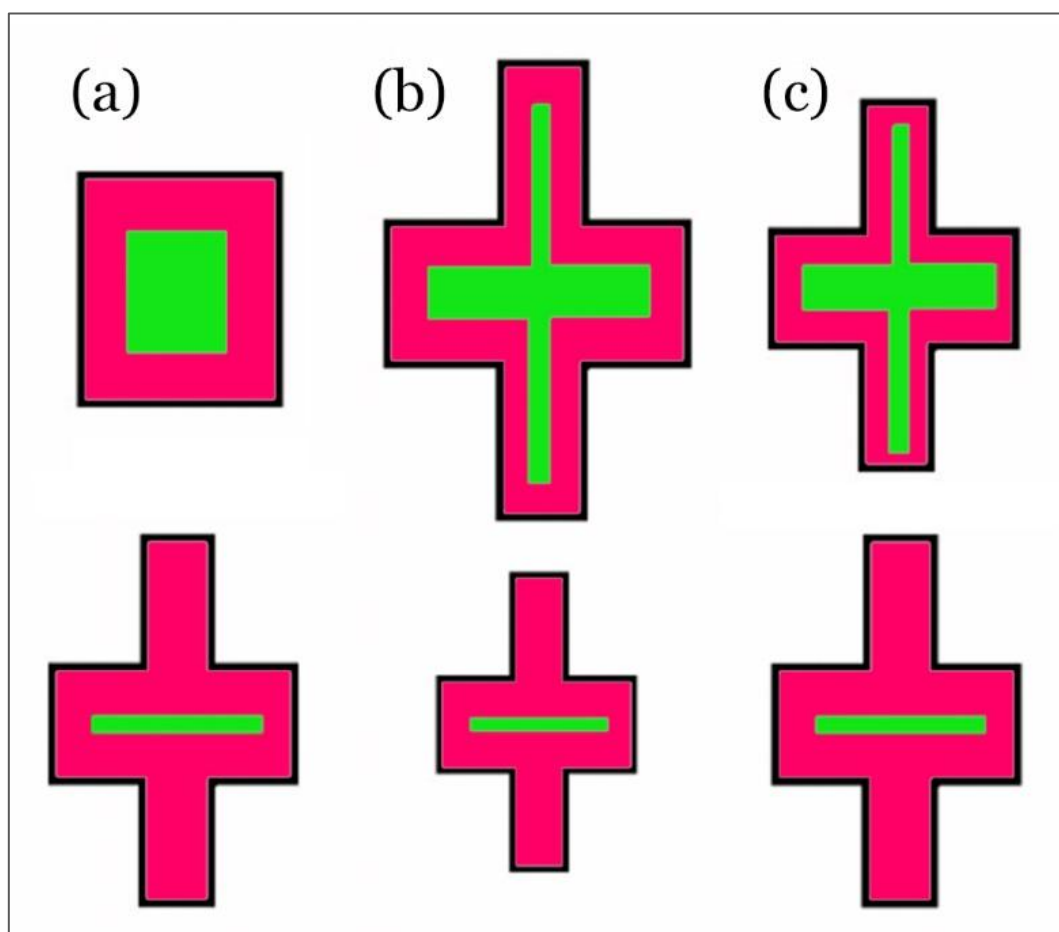


Figura 34 - Variazione del CORE al variare della forma (a), della dimensione (b), e dell'*edge-depth* (c).

Proximity index (PROX) quantifica il contesto spaziale di una *patch* appartenente ad una determinata *class*, in relazione alle *patch* della stessa *class*. Nello specifico, PROX distingue distribuzioni sparse di piccole *patch* da configurazioni in cui il *landscape* comprende un complesso raggruppamento di *patch* più grandi. Può essere ricondotto al livello di *class*, utilizzando le funzioni statistiche disponibili.

AGGREGATION METRICS

Clumpiness index (CLUMPY), è un indice normalizzato che descrive la deviazione rispetto ad una distribuzione *random*; un aumento nel valore di CLUMPY indica un aumento nell'uniformità di distribuzione e in un'aggregazione delle *patch* appartenenti alla stessa classe.

Patch cohesion index (COHESION), simile al *Perimeter-Area Ratio* pesato sull'area, risulta, tuttavia, invariante rispetto ai cambi di risoluzione; è variabile tra 0 e 1, il che lo rende più semplice da interpretare.

normalized Landscape shape index (nLSI), è la versione normalizzata del *Landscape shape index* (LSI), metrica che può essere interpretata come una misura della aggregazione delle varie tipologie di *class*:

$$LSI = \frac{E}{\min E}$$

dove

E è la lunghezza totale del contorno di una *class*, espressa come numero di celle; $\min E$ è la lunghezza minima possibile del contorno di una *class* in una condizione di massima aggregazione della *class* stessa, espressa come numero di celle.

La versione normalizzata, nLSI, presenta valori nell'intervallo 0-1, ovvero dalla valore minimo teorico (massima aggregazione), al massimo teorico (minima aggregazione).

Interspersion and juxtaposition index (IJI), metrica che considera in maniera esplicita la configurazione spaziale delle *patch*, rappresentando il livello di *interspersione*; essa indica cioè come sono intervallate nel *landscape* le classi l'una rispetto all'altra.

L'indice può essere calcolato per la singola *class* o per l'intero *landscape*, il cui bordo limite non è considerato nel computo. Per ogni classe si definisce:

$$IJI = \frac{-\sum_{j=1}^m \left[\left(\frac{e_{ij}}{\sum_{j=1}^m e_{ij}} \right) \ln \left(\frac{e_{ij}}{\sum_{j=1}^m e_{ij}} \right) \right]}{\ln(m-1)} \cdot 100$$

Con m numero di classi presenti, mentre e_{ij} rappresenta la lunghezza totale del confine tra classe i e j . L'indice è definito in percentuale rispetto alla massima dispersione possibile, dato il numero di classi; valori bassi di IJI caratterizzano paesaggi in cui le *patch* delle *class* sono distribuite non proporzionalmente o sono fortemente aggregate, tende a 100 (valore massimo) quando la classe considerata è ugualmente adiacente a tutte le altre classi (Figura 35).

SUBDIVISION METRICS:

Effective mesh size (MESH), metrica che esprime la dimensione della *patch* [ha] accessibile da una cella random senza dover abbandonare quella *patch*. È una misura del grado di suddivisione di una *class* di *patch*; il limite inferiore di MESH è costituito dalla dimensione della cella ed è ottenuto quando il paesaggio è suddiviso al massimo (cioè quando ogni cella di una *class* è separata dall'altra); al contrario MESH è massimo quando il paesaggio è costituito da una sola *patch*.

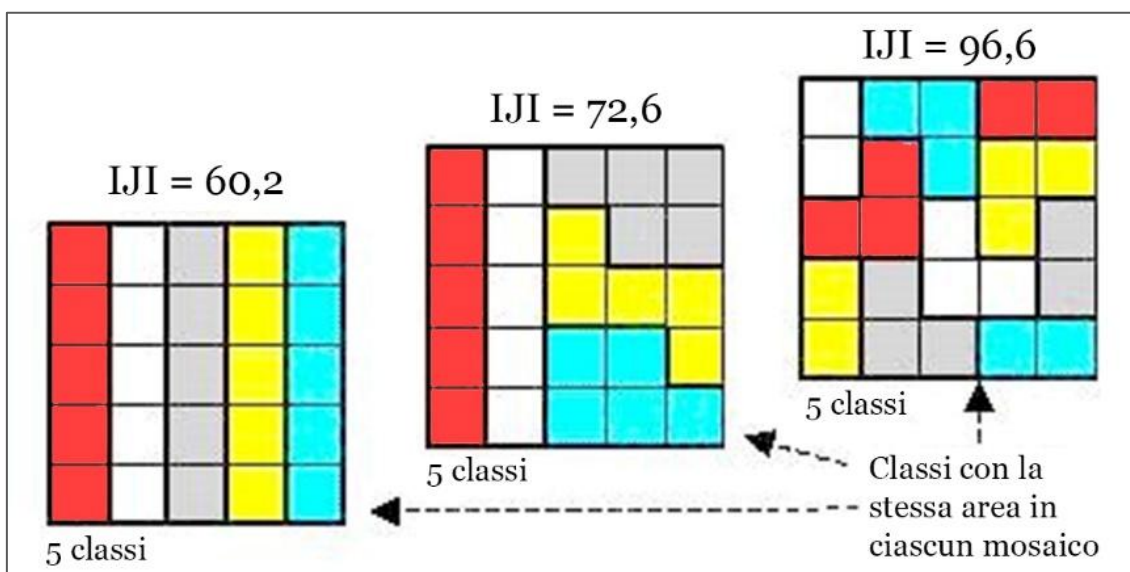


Figura 35 – Rappresentazione schematica della variazione dell'IJI, calcolato al livello *landscape*, al mutare della configurazione spaziale delle *class* di *patch*.

CAPITOLO 8 - Redazione di una mappa di adattamento al *climate change*. Una proposta metodologica

La metodologia proposta per la redazione di una mappa di adattamento al cambiamento climatico si articola in 4 fasi.

La prima fase riguarda la selezione di un *set* di indicatori di morfologia urbana e di configurazione del verde urbano. Tale selezione è da effettuarsi in ragione del dettaglio dei dati a disposizione, sulla base dell'analisi della letteratura scientifica (cfr. Capitolo 7).

La terza fase della metodologia riguarda, invece, l'elaborazione di una mappa dei climatopi in ambiente GIS, mediante la realizzazione di due livelli informativi rappresentativi degli aspetti che maggiormente condizionano il clima urbano: il *Carico Termico*, o *Thermal Load* (TL), e il *Potenziale Dinamico*, o *Dynamic Potential* (DP) (Figura 36).

Chiaramente, prima di produrre i livelli informativi sopracitati, sarà necessario fissare una unità minima di analisi. La scelta può ricadere sulla discretizzazione del territorio da analizzare in unità regolari o sull'adozione di perimetrazioni di differente ampiezza e forma, spesso ricalcanti elementi fisici della struttura urbana (ad esempio, sezioni di censimento).

Tale decisione deve esser presa valutando, in primis, le caratteristiche dei dati di base a disposizione e la loro eterogeneità in termini di risoluzione spaziale. In secondo luogo, è necessario considerare che, per unità minime di analisi non omogenee sarà opportuno, nel caso del calcolo di indicatori ad esse riferiti, normalizzare gli stessi rispetto alla relativa estensione superficiale.

Il Carico Termico è espressione dell'intensità di calore immagazzinato o emesso dalle aree urbane ed è funzione della morfologia urbana, intesa come combinazione di parametri urbanistici e di dotazione di superfici vegetate ed evapotraspiranti (cfr. Capitolo 6).

Il livello informativo relativo al Carico Termico, dunque, è rappresentativo della 'capacità' di un tessuto urbano di accumulare calore, per effetto della sua particolare configurazione morfologica e della presenza diffusa o meno, di spazi verdi.

La costruzione della mappa del Carico Termico prevede che sia operato un distinguo tra aree urbanizzate e non urbanizzate. È cioè necessario trattare diversamente le aree in cui il grado di urbanizzazione è così poco intenso da non provocare alterazioni sul clima urbano. Oke, ad esempio, nella classificazione delle *Urban Climate Zone*, tessuti urbani distinti in base alla loro capacità di influenzare il clima locale, definiva *rurali* gli ambiti con Rapporto di impermeabilizzazione minore del 10%. (Oke, 2006) (Figura 37).

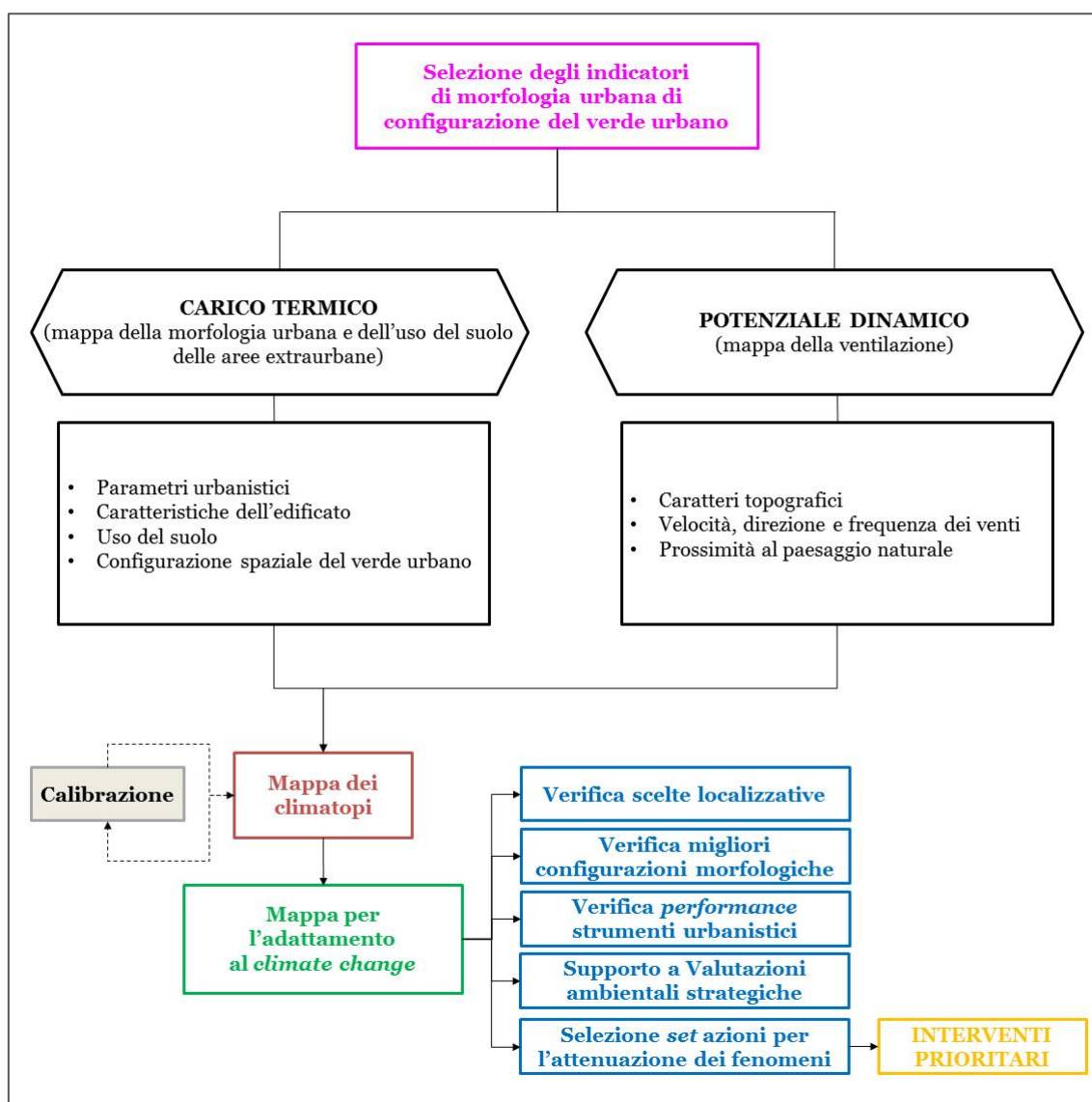


Figura 36 - Rappresentazione schematica della metodologia proposta.

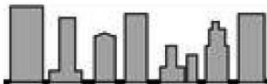






UCZ	descrizione	immagine	classe di rugosità	rapporto di verticalità dei canyon urbani λ_s	% impermeabile
1	zona intensamente urbanizzata con edifici separati, ravvicinati, ad elevato sviluppo verticale, con rivestimento (p.es. centro città con grattacieli)		8	>2	>90
2	zona intensamente e molto densamente urbanizzata, con edifici a 2-5 piani, contigui o molto ravvicinati, spesso di mattoni o pietra (p.es. centro storico)		7	1.0-2.5	>85
3	zona molto urbanizzata, a media densità, con edifici in fila o separati, ma comunque ravvicinati (p.es. area residenziale)		7	0.5-1.5	70-85
4	zona molto urbanizzata, a densità media o bassa, con edifici estesi e bassi e parcheggi asfaltati (p.es. area commerciale)		5	0.05-0.2	70-95
5	zona suburbana mediamente sviluppata, a bassa densità, con case a uno o due piani (p.es. aree residenziali suburbane)		6	0.2-0.6 (>1 se con alberi)	35-65
6	zone destinate ad uso misto, con grandi edifici circondati da vaste aree non edificate (p.es. ospedali, aeroporti)		5	0.1-0.5, dipende dagli alberi	<40
7	zone semi-rurali, con case sparse in un'area naturale o agricola (p.es. fattorie)		4	>0.05, dipende dagli alberi	<10

Figura 37 - *Urban Climate Zone* secondo la classificazione proposta da Oke (Bonafè, 2006 su dati WMO, 2006).

La valutazione associata al grado di urbanizzazione ricopre un ruolo fondamentale, in quanto, influisce sull'eventuale calcolo dell'intensità dell'isola di calore urbana, computato come differenza tra la temperatura di un'area urbanizzata e quella delle aree rurali circostanti.

L'estrema variabilità delle aree urbane europee, in termini di morfologia urbana, fa sì che classificazioni dei tessuti urbani ricavate da esempi di letteratura non garantiscano una descrizione efficace della struttura urbana. Risulta necessario, dunque, nell'ottica di una generale applicabilità della metodologia ad un numero non limitato di contesti urbani, esaminare nel dettaglio le caratteristiche dei sistemi insediativi con tecniche che consentano di trattare un numero elevato di variabili.

A tal riguardo, la metodologia prevede, per ognuna delle unità minime di analisi, in precedenza definite come urbanizzate, il calcolo in ambiente GIS degli indicatori selezionati nelle due fasi precedenti. In seguito, il *set* di dati, in cui ogni osservazione (unità di analisi) è descritta dallo specifico valore che per essa assumono i p indicatori calcolati, è analizzato con la tecnica statistica multivariata dell'Analisi delle Componenti Principali, o *Principal Component Analysis* (PCA). La PCA è un metodo fattoriale per la sintesi di p variabili quantitative, tra loro correlate, attraverso l'identificazione di $h < p$ variabili latenti (non osservate), dette *componenti principali*, che sono tra loro non correlate (ortogonali) e legate linearmente alle variabili di partenza e sono determinate in ordine decrescente rispetto alla percentuale di variabilità spiegata.

Successivamente, le osservazioni (ovvero le unità per le quali sono state calcolati i p parametri), espresse nel nuovo sistema di riferimento di h variabili (componenti principali con massima varianza), saranno sottoposte ad una *Analisi dei Cluster Statistici*, o *Cluster Analysis*. Tale tecnica mira a raggruppare le unità statistiche di una popolazione sulla base della loro similarità in termini di valori assunti dalle variabili osservate.

La *Cluster Analysis* consente di identificare un certo numero di raggruppamenti delle osservazioni aventi valori omogenei delle componenti principali, le quali saranno correlate con diversi gradi di intensità con le variabili rappresentate dai parametri p . I *cluster* individuati, dunque, descriveranno porzioni del territorio caratterizzate da valori omogenei dei parametri di morfologia urbana.

Ad essi, dunque, potrà essere associato un peso WF_{TL} crescente in funzione di quanto quel tipo di tessuto, a causa di particolari condizioni di morfologia urbana, sia predisposto ad immagazzinare calore. Un peso sarà associato anche

alle aree non urbanizzate, classificate in base all'uso del suolo prevalente, distinguendo tra ambiti agricoli, ambiti forestali, e altre tipologie di copertura del suolo proprie del territorio analizzato.

Il Potenziale Dinamico, invece, è principalmente dipendente dalla rugosità del terreno che influenza la ventilazione e il ricambio dell'aria. I fattori principali per la valutazione del Potenziale Dinamico comprendono la copertura del suolo da parte degli edifici, le caratteristiche dei venti prevalenti la prossimità al paesaggio naturale e agli spazi aperti, per tenere conto dell'influenza di brezze di terra e di mare.

La valutazione della rugosità del suolo, tuttavia, in particolare per le aree urbanizzate, è introitata nell'analisi morfologica e, pertanto, essa non è presa in considerazione nella costruzione del livello informativo relativo al Potenziale Dinamico. Quest'ultimo, al contrario, sarà caratterizzato dalle zone che, per altitudine, pendenza dei suoli, distanza dalla costa o da grandi spazi aperti, sono differentemente esposte ai venti dominanti. A tali aree sarà attribuito un peso WF_{DP} crescente (in valore assoluto) maggiore sarà il beneficio, in termini di ventilazione, garantito dalla particolare condizione geografica e topografica dell'area stessa.

La terza fase della metodologia, dunque, contempla la combinazione della mappa del Carico Termico con la mappa del Potenziale Dinamico per ottenere una 'zonizzazione' climatica del territorio. Le zone così individuate, ovvero aggregazioni di esse, costituiranno i *climatopi* per i quali definire le strategie di intervento.

Al fine di verificare la correttezza dei pesi attribuiti il modello dovrebbe essere calibrato utilizzando dati di temperatura rilevati, direttamente (rilievi puntuali) o indirettamente (termografie da dati telerilevati).

La quarta ed ultima fase, infine, contempla, sulla scorta dei risultati delle analisi condotte per la redazione della mappa dei climatopi, la redazione della mappa per l'adattamento al *climate change*, ottenuta per aggregazione di climatopi simili con lo scopo di identificare zone con differenti suscettibilità dal punto di vista climatico e per le quali siano da mettere in essere azioni aventi natura e priorità differenti.

Tali zone identificano, in altre parole, le aree del territorio in cui è necessario programmare azioni di conservazione ovvero interventi di modifica dell'ambiente costruito, o ancora una insieme calibrato di entrambe le strategie. Gli output della metodologia si configurano come utili strumenti per la valutazione delle *performance* degli strumenti urbanistici e territoriali e per la selezione di azioni virtuose per l'attenuazione ed il contrasto ai fenomeni analizzati.

A tal riguardo, si è sviluppata una metodologia di scelta degli interventi prioritari da mettere in atto in uno specifico climatopo per aumentarne efficacemente la capacità di adattamento al cambiamento climatico. Tale ultimo *step* si suddivide in tre sottofasi. La prima contempla la redazione della tabella degli interventi e la stima dell'efficacia degli stessi. La seconda fase, invece, consiste nella valutazione della fattibilità e della coerenza delle azioni con riferimento alle caratteristiche urbanistiche del climatopo preso in esame. L'ultima fase, infine, prevede la classificazione delle azioni in base al livello di priorità, distinti per scala di intervento.

La metodologia è stata descritta, in questa fase, nella sua struttura elementare.

Il percorso metodologico, è implementabile a partire da dati comunemente utilizzati nella prassi tecnico-urbanistica e ciò lo rende applicabile a contesti ampi e diversificati. L'impianto metodologico è tale per cui l'eventuale disponibilità di ulteriori livelli informativi rispetto ai dati minimi richiesti, pur arricchendo il livello di dettaglio, non genera ridondanza nella descrizione della struttura urbana.

Gli aspetti analitici ed operativi di dettaglio della metodologia sinteticamente descritta sono trattati nella Parte IV, ove è proposta una applicazione effettuata per il caso studio dell'area metropolitana di Napoli.

PARTE IV
***Sperimentazione sull'area metropolitana di
Napoli***



CAPITOLO 9 - Aspetti introduttivi

Premessa

La metodologia descritta nel Capitolo 8 suoi aspetti teorici è stata applicata al caso studio dell'area metropolitana di Napoli.

La metodologia si compone di 4 fasi principali. La prima prevede la selezione degli indicatori di morfologia urbana e di configurazione spaziale delle aree verdi da impiegare nell'espletamento dei successivi passaggi della metodologia. La seconda è relativa alla costruzione dei due principali livelli informativi necessari per l'individuazione dei climatopi ovvero la mappa del Carico Termico (TL) e la mappa del Potenziale Dinamico (DP). Una terza fase riguarda la combinazione delle due mappe sopracitate per ricavare la mappa dei climatopi e la calibrazione del modello attraverso il confronto con la termografia. L'ultima fase, infine, comprende la redazione della mappa per l'adattamento al *climate change* e la selezione degli interventi prioritari.

Le analisi sono state condotte sulla base di livelli informativi resi liberamente disponibili sui portali istituzionali dell'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT), della Regione Campania e della Città Metropolitana di Napoli. Ulteriori dati sono stati forniti, per esclusivo scopo di ricerca scientifica, dal Servizio SIT della Città Metropolitana di Napoli.

Inquadramento territoriale

La Città Metropolitana di Napoli, ente territoriale istituito dalla legge 56/2014 che ha sostituito la Provincia di Napoli, si estende su una superficie di 1.171 km² e comprende 92 comuni. La sua configurazione geomorfologica è il risultato di un complesso intreccio di sistemi vulcanici, massicci calcarei e pianure piroclastico-alluvionali. Le coste del golfo affacciano sul mar Tirreno e confinano a nord con il litorale Domizio, a sud-est con la costiera amalfitana. La pianura campana che si estende alle spalle dei rilievi ubicati in prossimità della costa – da ovest verso est, i Campi Flegrei, le Colline di Napoli e il Vesuvio –

confina a nord con il casertano e la Valle Caudina, a nord est con il baianese e il Vallo di Lauro, a est sul versante vesuviano con l'agro nocerino-sarnese.

A fronte di una limitata estensione territoriale (è l'ultima delle 14 città metropolitane italiane per superficie) accoglie una popolazione totale di circa 3 milioni di abitanti, che la rende il primo l'ente territoriale intermedio della penisola per densità abitativa.

Il clima è tipicamente mediterraneo, eccezion fatta per poche zone interne dove lo stesso ha caratteristiche più marcatamente continentali.

La cementificazione diffusa e speculativa ha trasformato gran parte della pianura rurale interna in una enorme periferia. Inoltre, detta trasformazione ha cancellato le aree verdi rurali preesistenti senza fornire un adeguato apporto di parchi urbani o spazi verdi. Tali fattori hanno prodotto una sostanziale alterazione climatica, in particolare nelle aree interne in cui sono rilevabili valori estremamente elevati di temperatura.

L'area metropolitana di Napoli è un interessante campo di applicazione a causa delle differenti condizioni microclimatiche presenti al suo interno, dalle zone costiere alle zone collinari, alle pianure interne

Le analisi effettuate nell'ambito dell'attività di ricerca e descritte nel presente capitolo sono state compiute limitatamente a 75 comuni, i più popolosi e densamente urbanizzati dell'area metropolitana di Napoli¹² (Figura 38).

Costruzione del *database*

Per eseguire le analisi previste dalla metodologia, è stato impiegato un set di dati georeferenziati (UTM-WGS84) estratti dal database topografico (DBT) della Regione Campania, derivato dalla Carta Tecnica Regionale (scala 1: 5000, edizione 2004/2005). I dati del suddetto DBT comprendevano i poligoni di un certo numero di destinazioni d'uso quali:

- Edifici;
- Superfici impermeabilizzate;

¹² Sono stati esclusi dalle analisi i Comuni della penisola sorrentina (Agerola, Vico Equense, Meta di Sorrento, Piano di Sorrento, Sant'Agnello, Sorrento, Massa Lubrense) e delle isole del golfo (Capri, Anacapri, Ischia, Serrara Fontana, Lacco Ameno, Casamicciola Terme, Forio, Barano d'Ischia, Procida).

- Strade primarie e secondarie;
- Attrezzature sportive;
- Verde Pubblico (parchi, aiuole, verde di svincolo delle strade).

È stata, inoltre, acquisita la Carta dell'Uso Agricolo del Suolo (CUAS) della Regione Campania redatta nel 2009 in scala 1:10.000.

Dal sistema informativo territoriale (SIT) della Città Metropolitana di Napoli sono, inoltre, stati acquisiti il Modello Digitale del Terreno (DTM) e il Modello Digitale delle Superfici (DSM) –resi disponibili in formato ASCII, con una elevatissima risoluzione ($1\text{ m} \times 1\text{ m}$), risultato di un rilievo LIDAR effettuato tra il 2009 e il 2012 – e le ortofoto aeree (Figura 39).

Nella presente applicazione, inoltre, il livello informativo relativo alla temperatura è stato ottenuto con una tecnica di misura indiretta, il telerilevamento. I valori di temperatura sono stati estratti da una termografia, prodotta dal Servizio SIT della Provincia di Napoli, in collaborazione con il Consiglio Nazionale delle Ricerche, elaborata processando i dati acquisiti da un sensore aviotrasportato durante una campagna di rilievi condotta nell'estate del 2005.

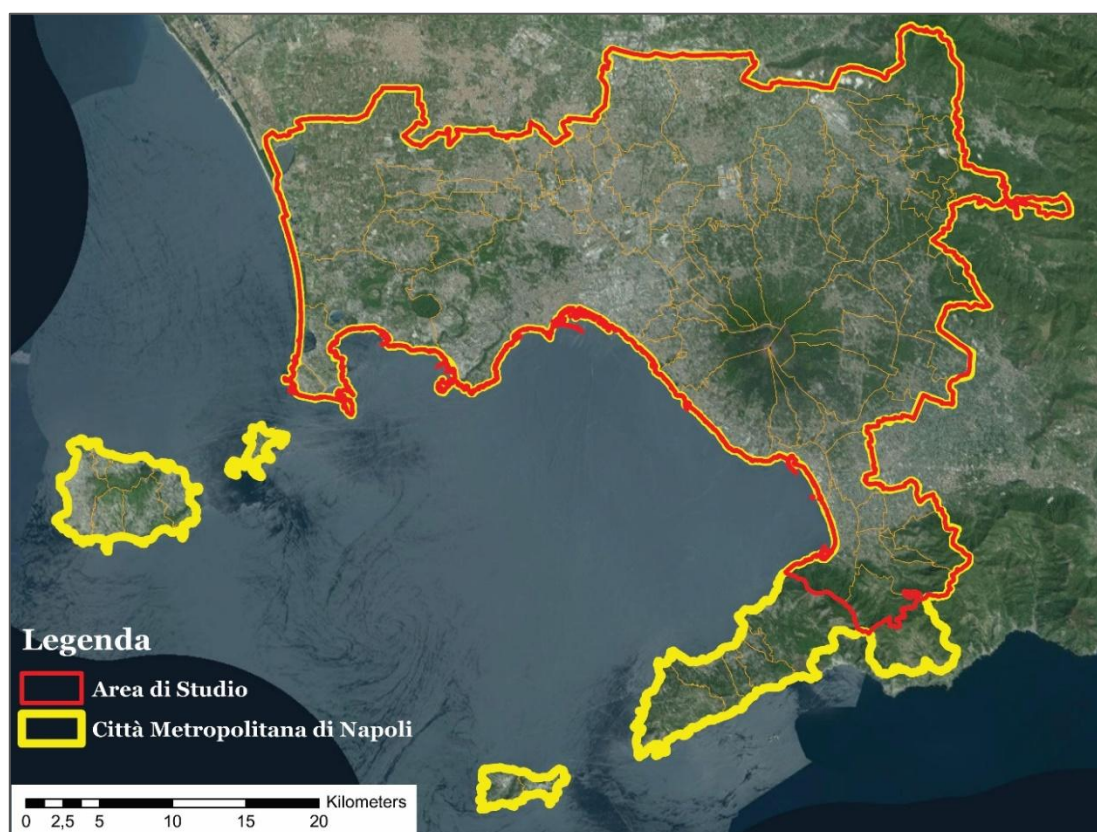


Figura 38 - Inquadramento territoriale dell'area oggetto di studio.

L'intero rilievo è costituito da immagini la cui alta risoluzione ($3\text{ m} \times 3\text{ m}$) ha consentito di identificare la temperatura fino al dettaglio del singolo edificio e di condurre una precisa e dettagliata analisi dei fenomeni in gioco (Figura 40).

Attraverso il trattamento delle immagini rilevate nel medesimo volo di cui alla termografia, si è potuto disporre di una mappa delle aree vegetate con la stessa elevata risoluzione ($3\text{ m} \times 3\text{ m}$), ricavata dal calcolo del NDVI (Figura 41).

Per quanto attiene alle informazioni sulla ventilazione, si è fatto riferimento all'*Atlante eolico italiano*, recante la mappatura della velocità media annua del vento a 25 metri dal livello del suolo. Per quanto riguarda, invece, la direzione e la frequenza dei venti principali, sono stati acquisiti dati relativi a 6 stazioni di rilevamento presenti sul territorio provinciale, e ad altri studi di dettaglio sulla circolazione dei venti nel Golfo di Napoli (Menna et al., 2008).

Si sono, infine, utilizzati i dati del censimento ISTAT 2001, in formato *shapefile*, divulgati per sezione di censimento (Tabella 8).

Tutte le operazioni sono state condotte con il *software ArcGIS* v. 10.2.

Tabella 8 - Caratteristiche dei principali livelli informativi

Livelli informativi	Formato	Risoluzione [m]/Scala	Fonte	Anno
Sezioni di censimento	vettoriale	/	ISTAT	2001
Carta Tecnica Regionale	vettoriale	1:5.000	Regione Campania	2004
DTB topografico	vettoriale	/		2004
Carta dell'uso agricolo del suolo	vettoriale	1:10.000		2009
DTM	<i>raster</i>	1	Città metropolitana di Napoli	2009÷2012
DSM	<i>raster</i>	1		
Ortofoto aeree	<i>raster</i>	0,4		2009
NDVI	<i>raster</i>	3	Città metropolitana di Napoli / CNR	2005
Termografia	<i>raster</i>	3		
Velocità del vento	vettoriale	/	RSE Spa	2009
Direzione e frequenza del vento	numerico	/	it.windfinder.com	2014÷2015

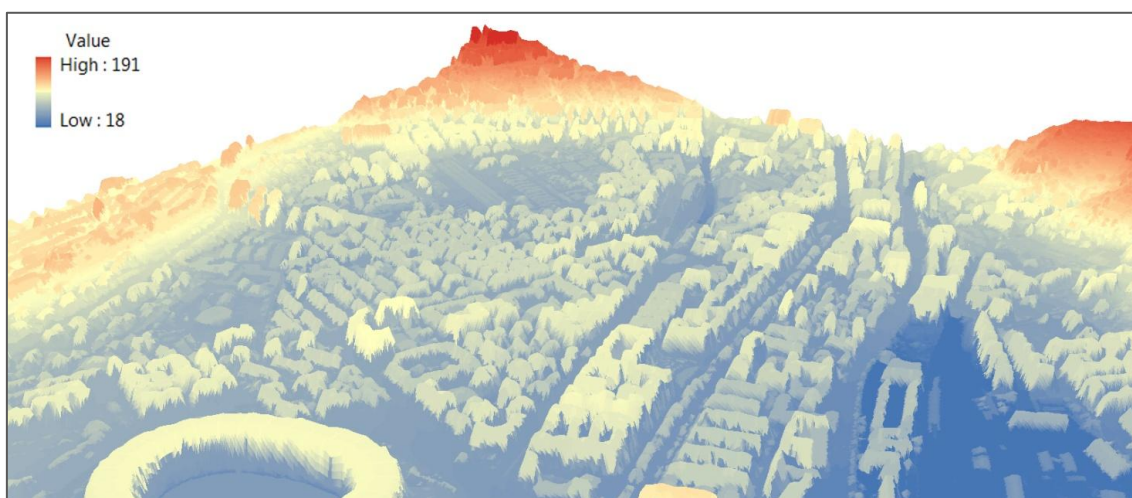


Figura 39 - Visualizzazione di una porzione del DSM, relativa al quartiere Fuorigrotta di Napoli, in *ArcScene*.

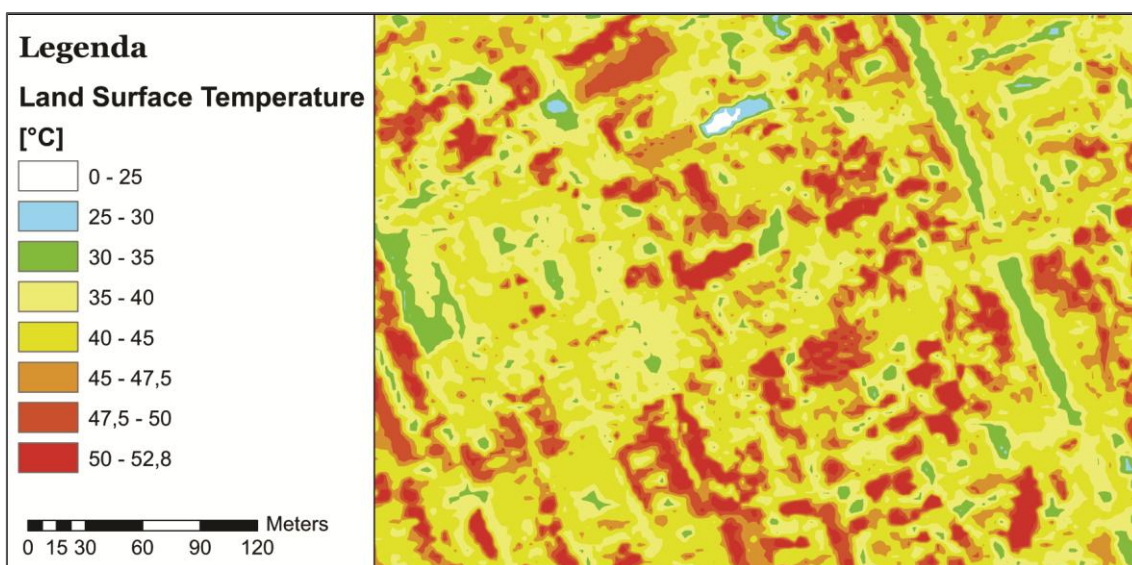


Figura 40 - Termografia ad alta risoluzione, ricavata da processamento di immagini telerilevate con sensore aviotrasportato.

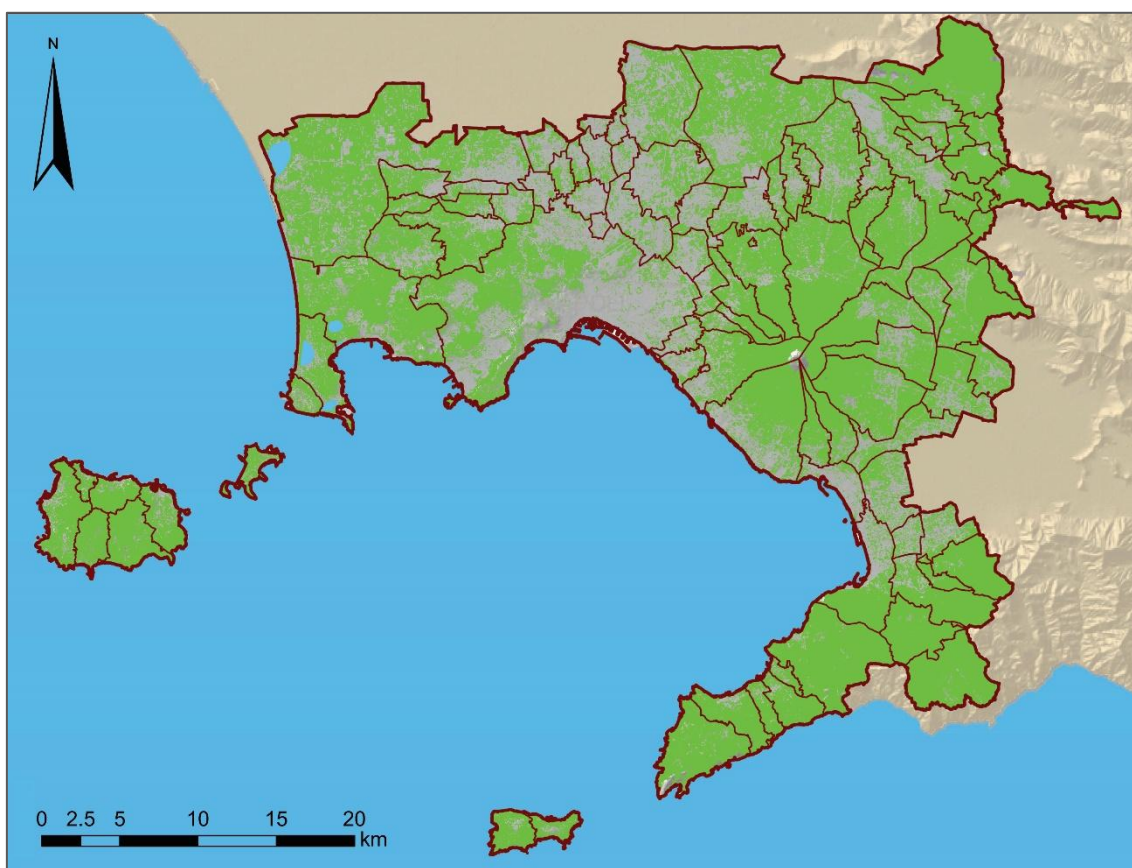


Figura 41 - Mappa dell'NDVI.

CAPITOLO 10 - Selezione degli indicatori

Indicatori di morfologia urbana

Il primo *step* della metodologia riguarda l'individuazione di un *set* di indicatori attraverso cui descrivere la morfologia dei tessuti urbanizzati all'interno dell'area oggetto di studio (cfr. Capitolo 8).

Nella presente applicazione la scelta degli indicatori di morfologia urbana è stata guidata in parte dalla letteratura scientifica, in parte dalla disponibilità dei livelli informativi necessari per la loro elaborazione (Tabella 9).

Per quattro indicatori prescelti (Densità edilizia, Rapporto di copertura, Altezza media degli edifici, Grado di impermeabilizzazione degli spazi aperti), un precedente studio, condotto sull'area metropolitana di Napoli, ne aveva dimostrato la stretta correlazione con la temperatura superficiale desunta da immagini telerilevate (Stanganelli, Soravia, 2012).

I suddetti indicatori sono stati integrati con altri 3 indicatori.

Si è scelto di selezionare lo *sky-view factor* (SVF), poiché capace di offrire una rappresentazione sintetica della forma dei *canyon urbani*. Inoltre, lo SVF è stato osservato avere una stretta relazione con la temperatura superficiale diurna in contesti territoriali analoghi a quello oggetto di analisi (Scarano, Sobrino, 2015). Sono, infine, stati selezionati due ulteriori indicatori, non esplicitamente descrittivi della forma urbana ma capaci di offrire indirettamente un contributo alla caratterizzazione dei tessuti urbanizzati: la *percentuale di edifici storici* (HBR) e la *percentuale di volumi industriali* (IBR) in un'unità di analisi.

Tessuti urbani con un'alta percentuale di edifici storici (costruiti prima del 1919), sono caratterizzati dalla presenza di edifici in muratura, con pareti perimetrali di spessore maggiore rispetto a quello adottato nei sistemi costruttivi recenti, e, dunque, dotati di maggiore inerzia termica; ciò comporta che gli edifici con tali caratteristiche siano 'naturalmente' più freschi e necessitino di un più contenuto fabbisogno di energia per il condizionamento meccanico. Inoltre, i sistemi di copertura degli edifici storici (tegole, coppi) presentano un'albedo maggiore di quelli generalmente contemplati nell'edilizia recente (tetti neri).

Tabella 9 - Set di indicatori descrittivi della morfologia urbana selezionati per il caso studio in esame.

Indicatore	Significato	Unità di misura	Campo di esistenza
SVF	<i>Sky-view factor</i>	%	0÷1
BD	Densità edilizia	m ³ /m ²	≥ 0
LCR	Rapporto di copertura	m ² /m ²	0÷1
MH	Altezza media degli edifici	m	≥ 0
NPOAR	Grado di impermeabilizzazione degli spazi aperti	%	0÷1
HBR	Percentuale di edifici storici (costruiti prima del 1919)	%	0÷1
IBR	Percentuale di volumi industriali	%	0÷1

Aree con un'alta percentuale di volumi industriali, invece, sono contraddistinte da un elevato carico antropogenico (produzione di calore legata alle attività svolte all'interno degli edifici), e da alti rapporti di impermeabilizzazione (grandi superfici coperte, piazzali asfaltati) che incidono in maniera significativa sulla temperatura superficiale.

Indicatori di configurazione delle aree verdi

Per la caratterizzazione delle aree verdi, attesa la forte incidenza che la stessa ha sul fenomeno oggetto di studio, è stata condotta un'analisi di dettaglio per esaminare la correlazione tra temperatura e diversi *pattern* spaziali del verde urbano. Le configurazioni spaziali sono state individuate con metriche di *landscape ecology*, e successivamente messe in correlazione con i valori di temperatura superficiale desunti dalla termografia.

I risultati di questa prima analisi, peraltro, hanno consentito di identificare quali dovrebbero essere la forma e la distribuzione ottimale delle aree verdi nel tessuto edificato.

Per effettuare tale analisi, sono state selezionate 553 aree *test* di dimensioni omogenee nel lato occidentale dell'area metropolitana di Napoli, aventi

analoghe caratteristiche urbanistiche, geografiche e topografiche. Le aree *test* sono state classificate in base alla localizzazione (4 classi di distanza dalla linea di costa: entro 1 km, entro 2 km, entro 5 km, oltre 5 km) e alla morfologia urbana (centri storici, aree moderne ad alta densità, aree moderne a bassa densità, aree miste) (Figura 42). Uno specifico *tool*, inoltre, è stato sviluppato con il *Model Builder* di *ArcGIS* per calcolare il valor medio della porzione di termografia ricadente nel perimetro di ogni area *test* (Figura 43)

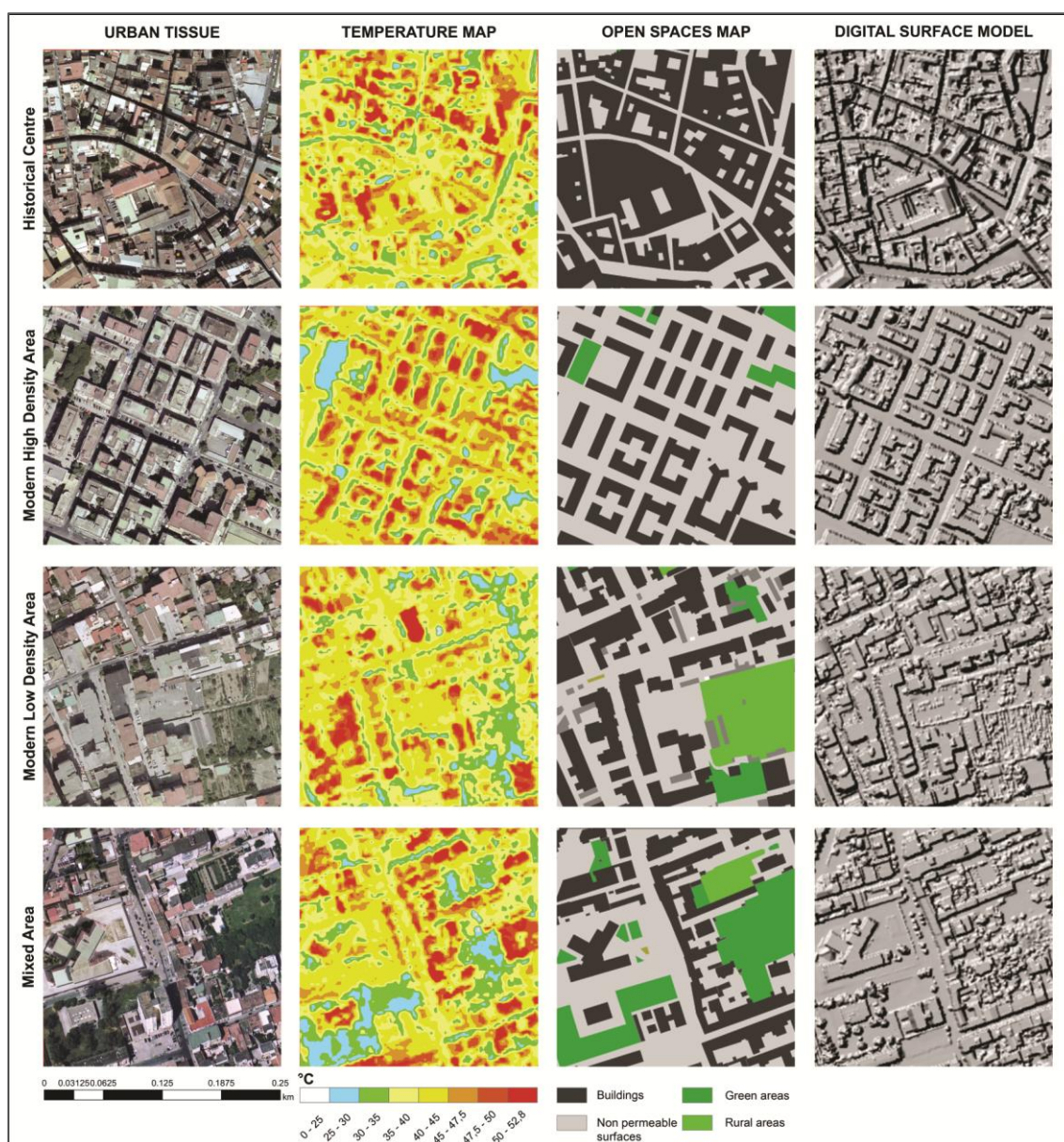


Figura 42 - Esempio delle tipologie di tessuto urbano analizzato confrontate con le corrispondenti termografie, mappe di uso del suolo e DSM.

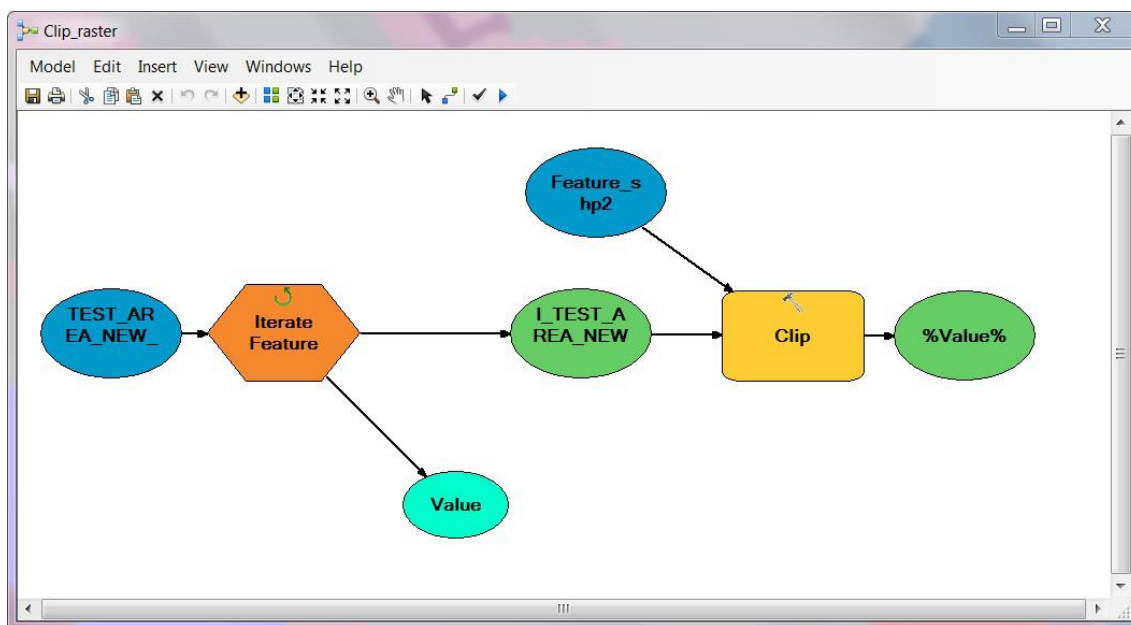


Figura 43 - Il *tool* sviluppato è articolato nella seguente successione di comandi: (1) taglio del *raster* della termografia utilizzando il *layer* vettoriale del perimetro dell'area *test* ed esportazione attribuendo al *raster* di output il codice identificativo dell'area *test*; (2) applicazione del comando *calculate statistics* sul *raster* di output per il calcolo della temperatura media dell'area *test*; (3) attribuzione del valore di temperatura precedentemente calcolato al *layer* del perimetro dell'area *test* con il comando di *join* utilizzando come *field* comune il codice identificativo delle aree *test*; (4) iterazione delle precedenti operazione per tutte le aree *test*.

La valutazione delle caratteristiche spaziali e distributive delle aree verdi all'interno delle aree *test* è stata condotta calcolando un set di metriche di *landscape ecology* utilizzando il *software* FRAGSTATS 4.2 (McGarigal, Marks, 1995).

Le metriche selezionate descrivono la configurazione delle aree verdi al livello di classe, fornendo informazioni riguardo la loro forma, posizione e distribuzione spaziale all'interno di ciascuna area *test*, garantendo un basso livello di ridondanza. Inoltre, alcune metriche calcolate al livello di *patch*, sono state ricondotte al livello di classe utilizzando alcune distribuzioni statistiche quali media, media pesata sull'area, deviazione standard e coefficiente di variazione (Figura 44).

Il grado di dipendenza tra ogni indicatore e la temperatura media è stato valutato calcolando il coefficiente di correlazione lineare di Pearson, dato dal rapporto tra la loro covarianza e il prodotto delle deviazioni standard delle due variabili:

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

Metrics group	Name	Description [units]	Relevant correlation with mean temperature (*)
Area & edge	Patch area	[ha]	•
	Patch radius of gyration	It measure how far across the landscape a patch extends its reach [m]	×
	Largest patch index	It expresses the percentage of the TA comprised of the single largest patch of class; as such, it's a simple measure of dominance [%]	•
	Total edge	It expresses an absolute measure of total edge length of patches belonging to the same class [m]	•
Shape	Perimeter-area ratio	[none]	×
	Fractal dimension index	It reflects shape complexity across a range of spatial scales (patch sizes) [none]	×
	Perimeter-area fractal dimension	It's similar to FRAC, but it is applied to a collection of patches at the class level [none]	×
	Related circumscribing circle	It expresses the ratio of patch area to the area of the smallest circumscribing circle [none]	×
Core area	Core area	It represents the area in the patch greater than a specified depth-of-edge distance from the perimeter, set equal to 10 m [ha]	•
Isolation	Euclidean nearest neighbor distance	It expresses the shortest straight-line distance between a focal patch and its nearest neighbor of the same class [m]	×
	Connectance index	It represents the percentage of all possible inter-patch connections less than a specified threshold distance, set equal to 20 m [%]	×
	Proximity index	It quantifies the spatial context of a patch, in relation to its neighbors of the same patch class [none]	•
Aggregation	Clumpiness index	It measures the aggregation degree of a patch class [none]	×
	Patch cohesion index	It measures the physical connectedness of the corresponding patch type [none]	×
	normalized Landscape shape index	It provides a simple measure of patch class aggregation or clumpiness [none]	×
	Interspersion and juxtaposition index	It measures interspersion or intermixing of a patch class [%]	×
Subdivision	Effective mesh size	It measures the subdivision degree of a patch class [ha]	•

(*) • relevant indirect correlation detected; × no correlation detected

Figura 44 - Caratteristiche delle metriche di paesaggio calcolate con Fragstats 4.2, con indicazione degli indicatori che hanno mostrato una maggiore correlazione con la temperatura superficiale delle aree *test*.

Soltanto alcune metriche hanno mostrato una incidenza positiva sul fenomeno delle alte temperature in area urbana.

Con riferimento alla dimensione delle aree verdi si è osservato che:

- maggiore è la frontiera delle aree verdi (la sommatoria dei perimetri in ogni area *test*), maggiore è il decremento della temperatura (*Total Edge*);
- più alta è la percentuale di area *test* compresa nella area verde più grande, minore è la temperatura rilevata (*Largest Patch Index*);

- più eterogenea è l'estensione e la forma delle aree verdi, maggiore è il contributo fornito al decremento della temperatura (deviazione standard di *Area* e *Core Area*).

Per quanto attiene, invece, alla distribuzione spaziale delle aree verdi si è riscontrato che:

- concentrazioni di aree verdi di limitate dimensioni e ravvicinate fra loro determinano un effetto positivo sulla riduzione di temperatura (*Proximity Index* pesato sull'area);
- meno sono suddivise le aree verdi e maggiore è il decremento delle temperature (*Effective Mesh Size*).

CAPITOLO 11 - Redazione delle mappe del Carico Termico e del Potenziale Dinamico

Valutazioni preliminari

Il terzo *step* della metodologia consiste nell'elaborazione dei due livelli informativi necessari per individuare i climatopi, il Carico Termico ed il Potenziale Dinamico. L'unità minima di analisi scelta è la Sezione di Censimento ISTAT, relativa al censimento della popolazione e delle abitazioni del 2001¹³.

Una mappa del Carico Termico dovrebbe fornire una rappresentazione della capacità dei tessuti urbanizzati di immagazzinare calore. Come più volte ricordato, ciò è influenzato dalla configurazione morfologica delle aree urbanizzate. Nell'applicazione di seguito descritta gli indicatori selezionati nella prima fase della metodologia – fortemente rappresentativi della suscettibilità di un tessuto urbano di accumulare calore – sono stati calcolati, in ambiente GIS, per ciascuna sezione di censimento urbana, e in seguito sottoposti a trattamento statistico attraverso le tecniche dell'Analisi delle Componenti Principali e dell'Analisi dei *Cluster*, al fine di individuare gruppi di aree con caratteristiche morfologiche omogenee. Tale analisi è stata effettuata solamente per le sezioni di censimento urbanizzate, ovvero quelle caratterizzate da valori del rapporto di impermeabilizzazione (NPR) maggiori del 15%.

Le sezioni non urbanizzate sono state analizzate evidenziandone il differente uso del suolo, secondo delle macrocategorie alle quali è riconducibile una diversa propensione all'accumulo di calore.

L'elaborazione risultante dall'unione delle analisi condotte sulle aree urbanizzate e non, rappresenta una mappatura delle zone del territorio analizzato alle quali si attribuisce un peso crescente, direttamente proporzionale alla capacità di immagazzinare calore.

¹³ I dati relativi al Censimento Istat 2011, disaggregati per sezioni di censimento, sono stati divulgati nel mese di settembre 2015, quando il presente studio era già stato praticamente ultimato. Inoltre, i dati cartografici utilizzati sono tutti databili in anni antecedenti il 2011, pertanto, l'utilizzo dei dati del censimento più recente avrebbe potuto determinare differenze sostanziali tra le basi di dati impiegate.

La mappa del Potenziale Dinamico, invece, dovrebbe essere rappresentativa degli aspetti riguardanti la ventilazione, con riferimento ai percorsi dei venti locali (direzione dei venti prevalenti, brezze di mare e di terra, di monte e di valle), zone in cui la velocità media del vento è ridotta a causa dell'urbanizzazione. Nell'applicazione proposta la mappa del Potenziale Dinamico è il risultato della combinazione di tre livelli informativi: una mappa dell'esposizione al vento, una mappa della velocità del vento e una della prossimità ai grandi spazi aperti. Come per la mappa del Carico Termico, anche alle zone individuate nella mappa del Potenziale Dinamico è attribuito un peso crescente (in valore assoluto), direttamente proporzionale alla propensione ad intercettare flussi di ventilazione naturale, dovuta a condizioni topografiche e localizzative (Figura 45).

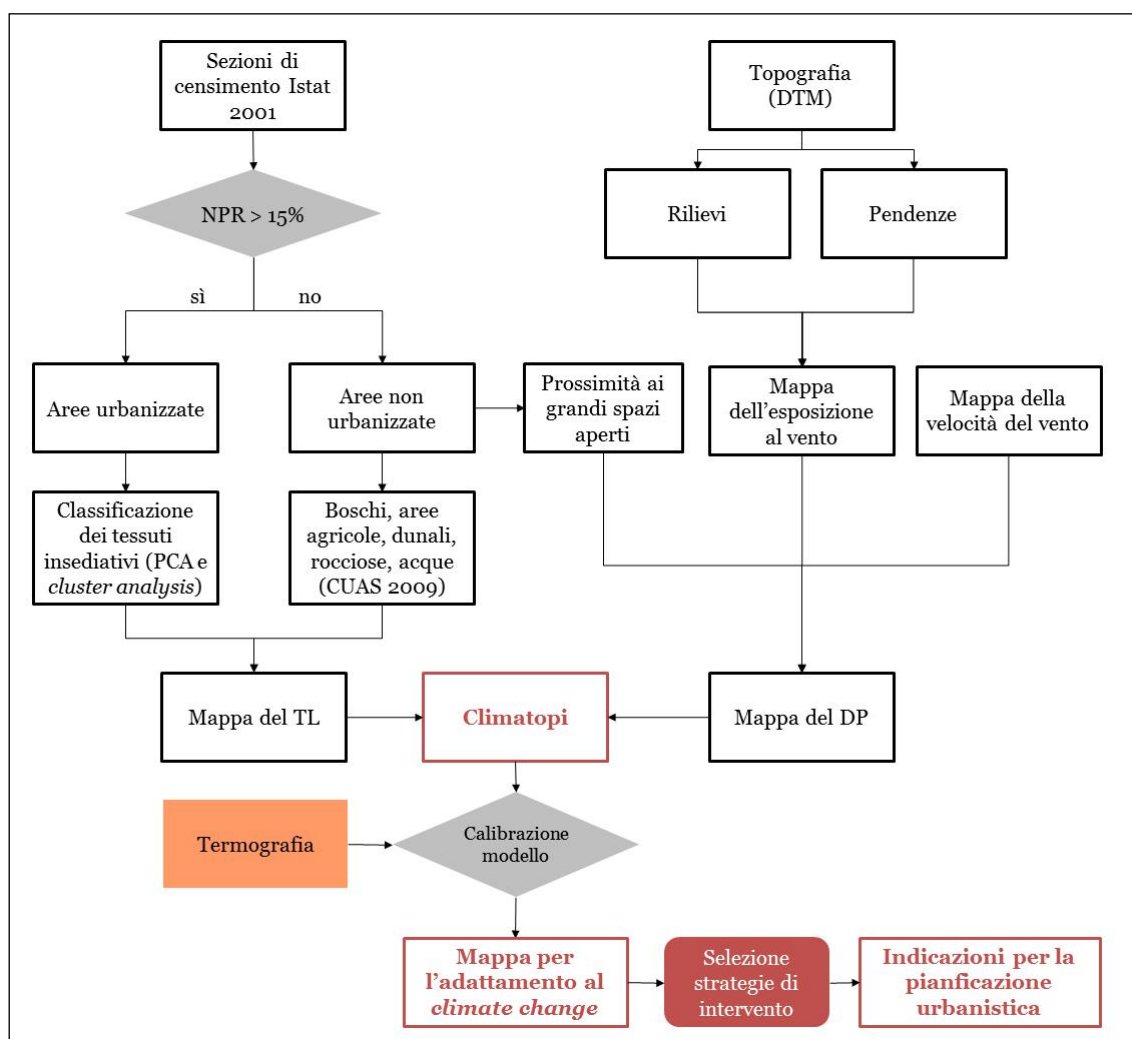


Figura 45 - Workflow della metodologia implementata.

Mappa del Carico Termico

La mappa del Carico Termico è stata ricavata processando i dati di base attraverso la seguente serie di operazioni sequenziali condotte in ambiente GIS.

Individuazione delle sezioni di censimento urbane

La prima operazione eseguita è stata la selezione delle sezioni di censimento aventi un grado di urbanizzazione tale da influire sul clima urbano modificandone i fattori di temperatura, umidità relativa, ventilazione.

Secondo quanto proposto da Oke, un indicatore significativo per caratterizzare differenti livelli di incidenza dell'urbanizzazione sul clima urbano è il rapporto di impermeabilizzazione. La soglia al di sopra della quale un'area presenta caratteristiche urbane è fissata da Oke al 10% del Rapporto di impermeabilizzazione. Nel caso in esame, per tenere conto del fatto che nel livello informativo dell'edificato fossero presenti anche gli impianti serricoli, tale soglia è stata innalzata al 15%.

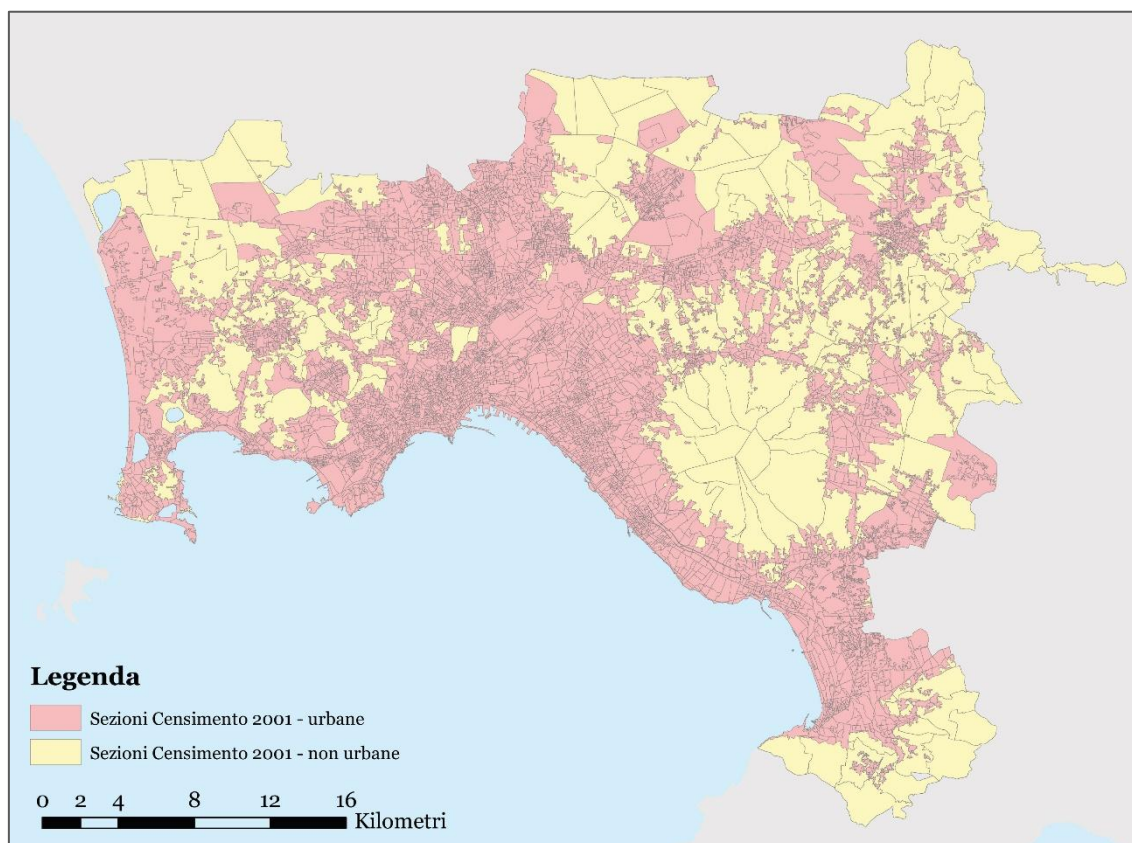


Figura 46 - Sezioni di censimento urbane.

Pertanto, le sezioni di censimento con un Rapporto di impermeabilizzazione NPR maggiore del 15% sono state classificate come *urbane* e, relativamente a queste ultime, sono stati calcolati 14 indicatori, selezionati (Figura 46, Tabella 11).

Tabella 10 - Indicatori di morfologia urbana calcolati nella redazione della UC-Map

Ambito di analisi	Indicatore	Significato	Unità di misura	Campo di esistenza
Ambiente urbano	SVF	<i>Sky-view factor</i>	%	0-1
	BD	Densità edilizia	m ³ /m ²	≥ 0
	LCR	Rapporto di copertura	m ² /m ²	0-1
	MH	Altezza media degli edifici	m	≥ 0
	HBR	Percentuale di edifici storici (costruiti prima del 1919)	%	0-1
	IBR	Percentuale di volumi industriali	%	0-1
	NPOAR	Grado di impermeabilizzazione degli spazi aperti	%	0-1
Aree verdi	NDVI	Percentuale di superfici vegetate	%	0-1
	GAMH	Altezza media della vegetazione delle superfici vegetate	m	≥ 0
	AREA_SD	Deviazione standard delle aree vegetate	ha	≥ 0
	LPI	<i>Largest patch index</i>	%	0-1
	CORE_SD	Deviazione standard del <i>core</i> delle aree vegetate (<i>edge depth</i> = 10 m)	ha	≥ 0
	PROX_AM	Indice di prossimità pesato sulla dimensione media delle aree verdi	/	≥ 0
	MESH	Indice del grado di suddivisione delle aree verdi	ha	rapporto tra la dimensione della cella e la dimensione dell'area di analisi

L'utilizzo della sezioni di censimento quali unità minime di analisi, può presentare alcune problematiche operative. Esse, infatti, presentano una notevole eterogeneità dimensionale. Le sezioni di censimento possono ricomprendere, talvolta, anche un solo edificio, Mentre, un'analisi della morfologia urbana necessita di unità di analisi con dimensioni superiori a quelle dell'isolato. È stato, pertanto, effettuato un correttivo sulle sezioni di censimento contenenti un solo edificio, procedendo all'aggregazione delle stesse a sezioni di censimento circostanti.

Calcolo degli indicatori

Alcuni indicatori relativi all'ambiente urbano (Densità edilizia, Rapporto di copertura, Altezza media) sono stati calcolati a partire dal *layer* vettoriale dell'edificato, estratto dalla Carta Tecnica Regionale del 2004, opportunamente processato per attribuire ad ogni poligono l'altezza calcolata come differenza tra la quota del DSM e la quota del DTM); l'operazione di calcolo del valor medio delle porzioni di immagini *raster* (DTM e DSM) ricadenti all'interno dei poligoni delle sezioni di censimento è stata effettuata con l'applicativo *Gis Geospatial Modelling Environment*, utilizzando la funzione *isectpolyst*.

In seguito, attraverso un *join spaziale* tra lo *shapefile* dell'edificato e quello delle sezioni di censimento, è stato attribuito ai poligoni degli edifici il codice della sezione di censimento in cui fosse ricaduto il centroide degli stessi. In tal modo, attraverso il comando di analisi spaziale *dissolve*, si è calcolata la somma dei volumi e delle superfici coperte relative a ciascuna sezione di censimento.

Il Rapporto di copertura e la Densità edilizia sono stati calcolati come descritto nel Capitolo 7, utilizzando come area di riferimento la superficie della sezione di censimento. L'altezza media degli edifici è stata calcolata come rapporto tra la sommatoria dei volumi e la sommatoria delle superfici coperte di tutti gli edifici all'interno di una sezione di censimento.

L'indicatore percentuale di edifici storici è stato computato utilizzando le informazioni tabellari delle sezioni di censimento ISTAT relative all'epoca dell'edificato. In particolare esso è dato dal rapporto tra il numero di edifici all'interno della sezione di censimento che, secondo i dati dell'Istat, sono stati realizzati prima del 1919, ed il numero totale di edifici presenti.

La percentuale di edifici industriali, invece, è data dal rapporto tra la somma dei volumi degli edifici industriali, caratteristica desunta dal *layer* della Carta Tecnica Regionale, e la volumetria totale all'interno della sezione di censimento. Lo SVF è stato invece calcolato con il software *Relief Visualization Toolbox*. Tale applicativo, sviluppato dall'*Institute of Anthropological and Spatial Studies* del *Research Center of the Slovenian Academy of Science and Arts*, processa un DTM ricercando il *pixel* con il massimo valore entro un certo raggio, fissato nel caso in esame pari a 20 *pixel* (20 metri), in un numero prestabilito di direzioni, posto pari a 16 per la presente applicazione. La frazione di cielo ostruito è computata come $sen\gamma$, dove γ è l'angolo di elevazione del *pixel* trovato. SVF è, dunque, calcolato come complementare a 1 della media della frazione di cielo ostruito calcolato nelle 16 direzioni stabilite. Il *software* restituisce un *raster* in cui ad ogni *pixel* è associato il valore di SVF computato come appena descritto. Lo SVF della sezione di censimento è stato dunque calcolato come valor medio della porzione di *raster* ricadente all'interno dello *shapefile* delle superfici scoperte di ogni sezione di censimento, utilizzando la funzione *isectpolyst* dell'applicativo Gis *Geospatial Modelling Environment* (Figura 47); La percentuale di superfici vegetate è stata computata trasformando in poligoni la mappa del NDVI e calcolando il rapporto tra la superficie di aree verdi ricadente in ogni sezione di censimento e l'area di quest'ultima.



Figura 47 - Rappresentazione dello SVF calcolato impostando un raggio di banda di 20 m.

L'altezza media delle superfici vegetate, invece, è stata valutata con una procedura analoga a quella seguita per il calcolo dell'altezza media degli edifici, con la differenza che i poligoni rispetto ai quali è stato stimato il valor medio del DSM e del DTM, erano rappresentati dalle aree vegetate così come ricavate nel calcolo della percentuale di aree verdi.

In ultimo, le metriche di *landscape ecology*, per la valutazione della configurazione spaziale delle aree verdi, sono state calcolate sviluppando un *tool* ricorsivo per il taglio del *raster* del NDVI con il poligono di ciascuna delle sezioni di censimento. I *raster* risultanti sono stati processati in FRAGSTATS v. 4.2, ed i risultati sono stati reimportati in ambiente GIS attraverso un operazione di *join*.

Analisi delle Componenti Principali

Si è proceduto, dunque, al trattamento statistico dei dati attraverso la tecnica dell'Analisi delle Componenti Principali (PCA) con il software *Rstudio*.

Lo scopo primario di questa tecnica è la riduzione di un numero più o meno elevato di variabili (rappresentanti altrettante caratteristiche del fenomeno analizzato) in alcune variabili latenti. Ciò avviene tramite una trasformazione lineare delle variabili che proietta quelle originarie in un nuovo sistema nel quale le variabili vengono ordinate in ordine decrescente di varianza: pertanto, la variabile con maggiore varianza è proiettata sul primo asse, la seconda sul secondo asse e così via. La riduzione della complessità avviene limitandosi ad analizzare le principali (per varianza) tra le nuove variabili.

È stato processato un *set* di dati costituito da 7974 osservazioni (sezioni di censimento) ognuna descritta da 14 variabili (indicatori).

Secondo i metodi di scelta presenti in letteratura, si è rilevato un numero di componenti principali significative, nel caso del set di dati in esame, pari a 3 (Figura 48).

Dalla sovrapposizione, nello spazio cartesiano avente come assi le 3 componenti principali selezionate, delle osservazioni e delle variabili si è potuto osservare, oltre alla coerenza delle correlazioni tra le variabili scelte, come entrambe le prime due componenti principali spieghino bene sia i parametri urbanistici (Densità edilizia, Rapporto di copertura, Altezza media) sia i parametri di

configurazione del verde urbano (deviazione standard dell'Area e del CORE, MESH) e che la prima componente principale sia correlata direttamente, e in maniera quasi perfetta con l'indicatore NDVI.

La terza componente principale, invece, spiega in misura decisamente maggiore rispetto alle altre due la percentuale di volumi industriali, il rapporto di impermeabilizzazione degli spazi aperti e l'indicatore *Largest Patch Index* (Figura 49).

Analisi Cluster

In seguito, al set di dati proiettato sulle prime 3 componenti principali si è applicata l'Analisi Cluster.

L'Analisi Cluster è un tecnica di analisi multivariata che mira a raggruppare le unità statistiche di un insieme di osservazioni sulla base della loro similarità in termini di valori assunti dalle variabili osservate.

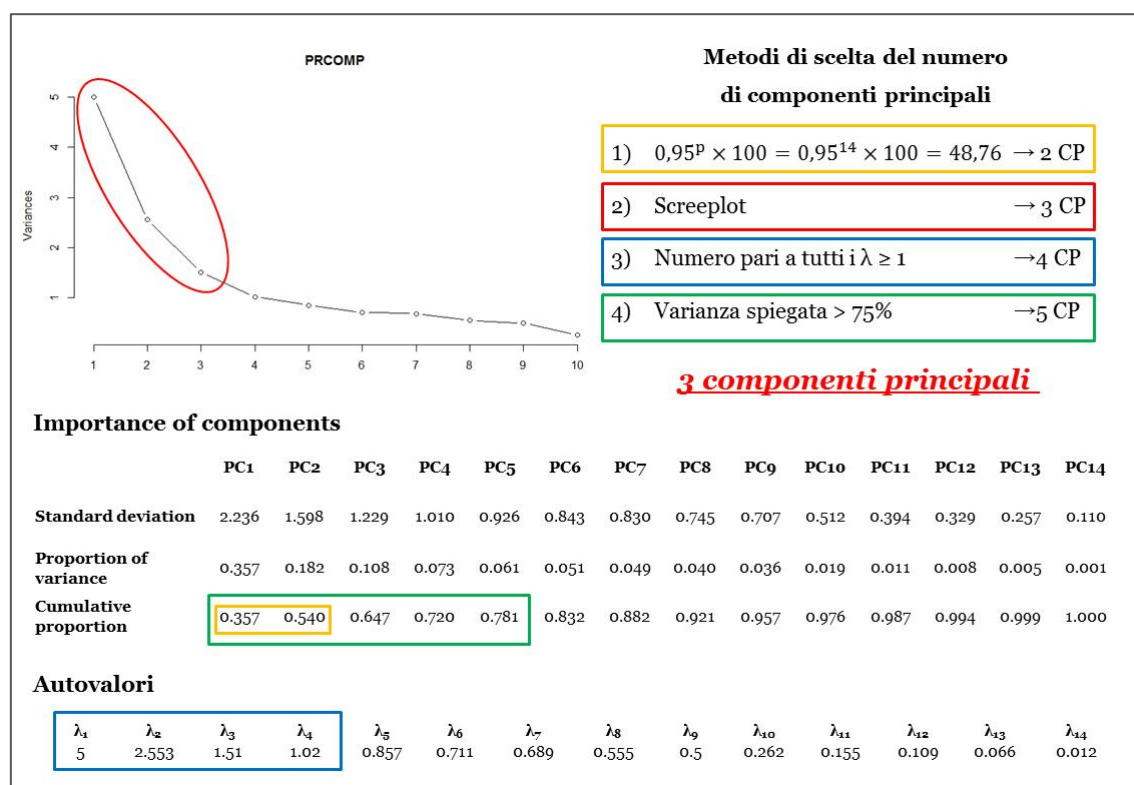


Figura 48 - Abstract grafico dei metodi di scelta del numero di componenti principali. La scelta è ricaduta sul metodo dello *screeplot* secondo il quale il numero di componenti rilevanti è pari a 3.

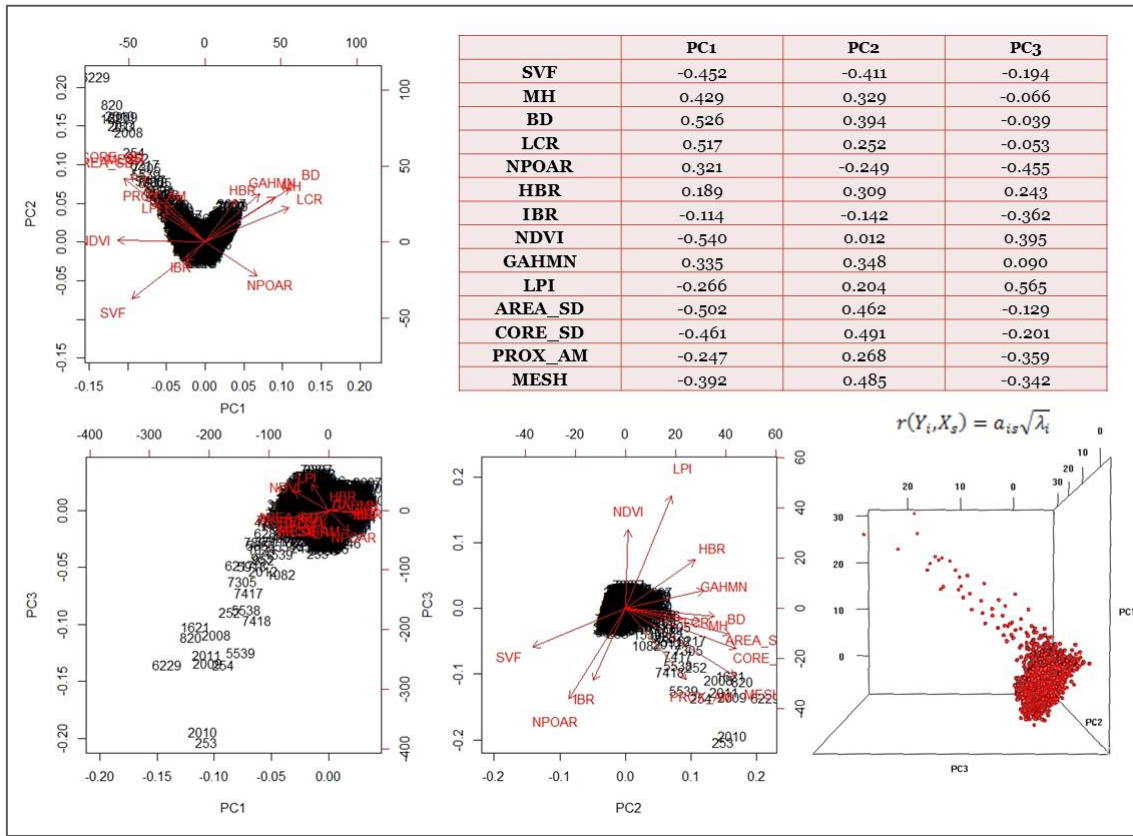


Figura 49 - Grafico delle osservazioni e sovrapposizione del grafico delle variabili nel piano cartesiano delle componenti principali.

L'obiettivo di una analisi *cluster* è quello di partizionare l'insieme delle osservazioni in modo che unità facenti parte dello stesso gruppo siano fra loro molto simili mentre unità facenti parte di gruppi diversi siano fra loro molto dissimili.

Come metodo per l'individuazione dei gruppi, è stato impiegato il metodo gerarchico di *Ward* o della minima devianza, basato sul teorema Huygens che permette di scomporre la devianza totale in devianza nei gruppi (W) e devianza tra i gruppi (B):

$$\sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^{I_q} (x_{iqk} - \bar{x}_k)^2 = \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q I_q (\bar{x}_{qk} - \bar{x}_k)^2 + \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^{I_q} (x_{iqk} - \bar{x}_{qk})^2$$

devianza totale = devianza tra i gruppi + devianza nei gruppi

dove

x_{iqk} è il valore della k-sima variabile, per l'i-sima osservazione del q-simo *cluster*;

\bar{x}_{qk} è il valor medio della k-sima variabile del q-simo *cluster*;

\bar{x}_k è il valor medio della k-sima variabile;

I_q è il numero di osservazioni nel q-simo *cluster*.

Il metodo di Ward non richiede il calcolo preliminare di una matrice delle distanze. Esso consiste nell'aggregazione di due *cluster* così che l'incremento di devianza nei gruppi sia minimo (ovvero minimizzando la riduzione della distanza tra i gruppi) ad ogni passo dell'algoritmo.

La gerarchia è rappresentata da un *dendrogramma* indicizzato dall'incremento della devianza nei gruppi.

I criteri di scelta del numero ottimo di *cluster* si basano implicitamente o meno sulla crescita della devianza.

Essi suggeriscono una divisione in gruppi Q quando l'aumento della devianza tra i gruppi (B) passando da $Q - 1$ a Q *cluster* è molto maggiore di quello che si ottiene passando da Q a $Q + 1$ *cluster*.

Un criterio empirico può formalizzare questa idea. Sia $\Delta(Q)$ l'aumento della devianza tra i gruppi (B) quando si passa da $Q - 1$ a Q *cluster*, il criterio proposto è il seguente:

$$\frac{\Delta(Q)}{\Delta(Q + 1)}$$

Il numero ottimo di *cluster* Q sarà quello che minimizzerà tale criterio.

Attesa la presenza di diverse decine di osservazioni con valori molto elevati di tutte e tre le componenti principali, corrispondenti a sezioni di censimento molto vegetate e con basse densità edilizie (tessuto metaurbano), sebbene il criterio empirico sopra descritto suggerisse di individuare 5 *cluster*, si è scelto di un numero di *cluster* pari a 6, dei quali 4 sono rappresentativi delle aree più densamente urbanizzate e si differenziano tra di loro per differenti livelli di

densità edilizia, di impermeabilizzazione dei suoli e di dotazione di superfici vegetate (Figura 50, Tabella 12).

L'analisi effettuata, dunque, restituisce 6 tipi di aree omogenee dal punto di vista morfologico.

Il *cluster* 1 è composto dalle osservazioni (sezioni di censimento) con alti valori di Densità edilizia, Rapporto di copertura, Altezza media, Percentuale di edifici storici, e i valori più bassi di SVF e NDVI, ed è interpretabile come insieme dei tessuti storici, prevalentemente presenti nei nuclei antichi delle città.

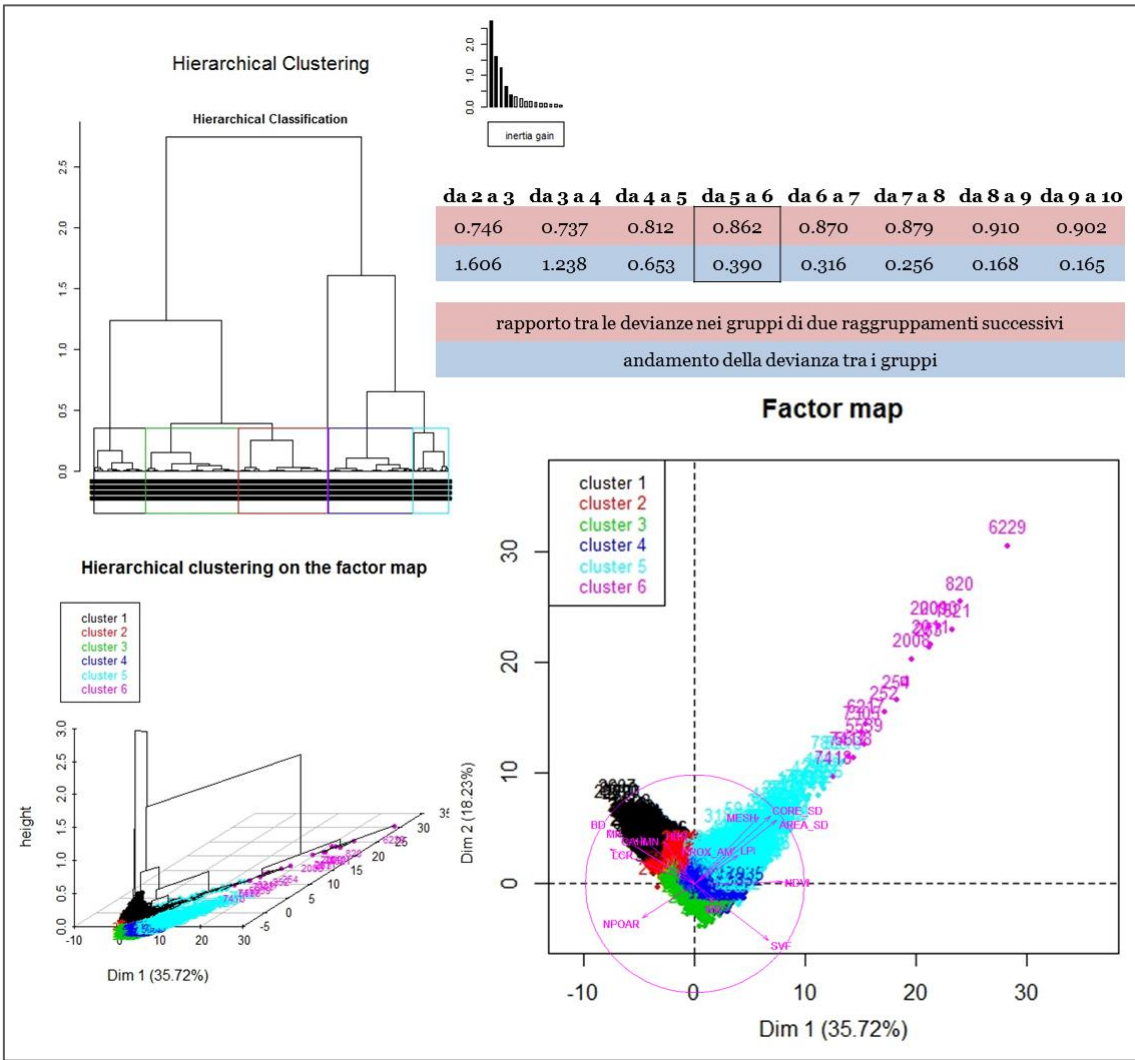


Figura 50 - Abstract grafico della *Cluster Analysis* effettuata con il metodo gerarchico di Ward.

Il *cluster 2* è, invece, costituito dalle sezioni di censimento con accentuati valori di Densità edilizia, Rapporto di copertura, Altezza media, Percentuale di edifici storici, bassi valori di SVF, NDVI, corrispondenti ai tessuti consolidati, le prime espansioni residenziali attorno ai centri storici, presumibilmente databili dagli anni '30 fino ai primi anni '70 del Novecento.

Il *cluster 3* riunisce le sezioni di censimento con accentuati valori del Rapporto di impermeabilizzazione degli spazi aperti, di SVF e della percentuale di volumi industriali, bassi valori di NDVI ed è interpretabile come l'insieme delle aree industriali o di aree a destinazione mista con basse densità edilizie.

Tabella 11 - Descrizione, interpretazione e numerosità dei *cluster*.

Cluster	Descrizione	Interpretazione	Numerosità	
			n.	%
1	alti valori di BD, LCR, MN, HBR, bassi valori di SVF, NDVI	centri storici	1148	14,39%
2	accentuati valori di BD, LCR, MN, HBR, bassi valori di SVF, NDVI	tessuto urbanizzato consolidato	1993	24,99%
3	accentuati valori di NPOAR e di SVF e IBR, bassi valori di NDVI	aree miste a bassa densità/aree industriali	2907	36,45%
4	moderati valori di NDVI e NPOAR, ma contenuti valori dei parametri di configurazione, bassi valori di BD, LCR, MH	aree miste a media densità	1918	24,05%
5	alti valori di NDVI, MESH, CORE_SD, AREA_SD, LPI	tessuto periurbano	802	10,06%
6	alti valori di NDVI, MESH, CORE_SD, AREA_SD, LPI	tessuto metaurbano	16	0,2%

Il *cluster* 4 è costituito dalle sezioni di censimento aventi contenuti valori di Densità edilizia, Rapporto di copertura, Altezza media e, al contempo, moderati valori del Rapporto di impermeabilizzazione degli spazi aperti e NDVI e contenuti valori delle metriche di configurazione; tali sezioni di censimento sono interpretabili come le aree a destinazione mista, con medie densità edilizie. In ultimo, i *cluster* 5 e 6, rappresentano gli insiemi di sezioni di censimento con valori molto alti di NDVI e delle metriche di configurazione, e densità edilizie molto basse, corrispondenti alle porzioni di territorio definibili rispettivamente come tessuto periurbano e metaurbano, afflitti dal fenomeno della diffusione insediativa. Il tessuto periurbano è quello che sorge in adiacenza alle aree più densamente edificate e presenta i primi caratteri di dispersione e frammentazione. Il tessuto metaurbano, invece, è ubicato a distanza maggiore dai centri urbani rispetto al territorio periurbano ed è caratterizzato da una bassa densità insediativa e da una mancata complementarietà tra impianto viario e trama edilizia.

Mapa dell'uso del suolo urbano

I risultati della *Cluster Analysis* sono stati importati in ambiente GIS e con un'operazione di *join*, utilizzando come campo comune il codice della sezione di censimento, è stato attribuito l'identificativo del *cluster* ad ogni unità di analisi. (Figura 51). Il *cluster* più abbondante in termini di superficie è il *cluster* 4, il quale occupa poco meno di un terzo del territorio oggetto di analisi (31,84%). A seguire il *cluster* 5 (circa il 25%) e il *cluster* 3 (21,65%). La somma dei primi due *cluster* ammonta a poco più del 10% dell'area di studio (Tabella 13).

Tabella 12 - Distribuzione percentuale dell'area dei *cluster* rispetto alla superficie totale delle aree urbanizzate.

Cluster	Area [Km²]	%
1	18,70	3,42%
2	43,31	7,92%
3	118,34	21,65%
4	173,98	31,84%
5	136,45	24,97%
6	55,71	10,19%
TOTALE	546,50	100%

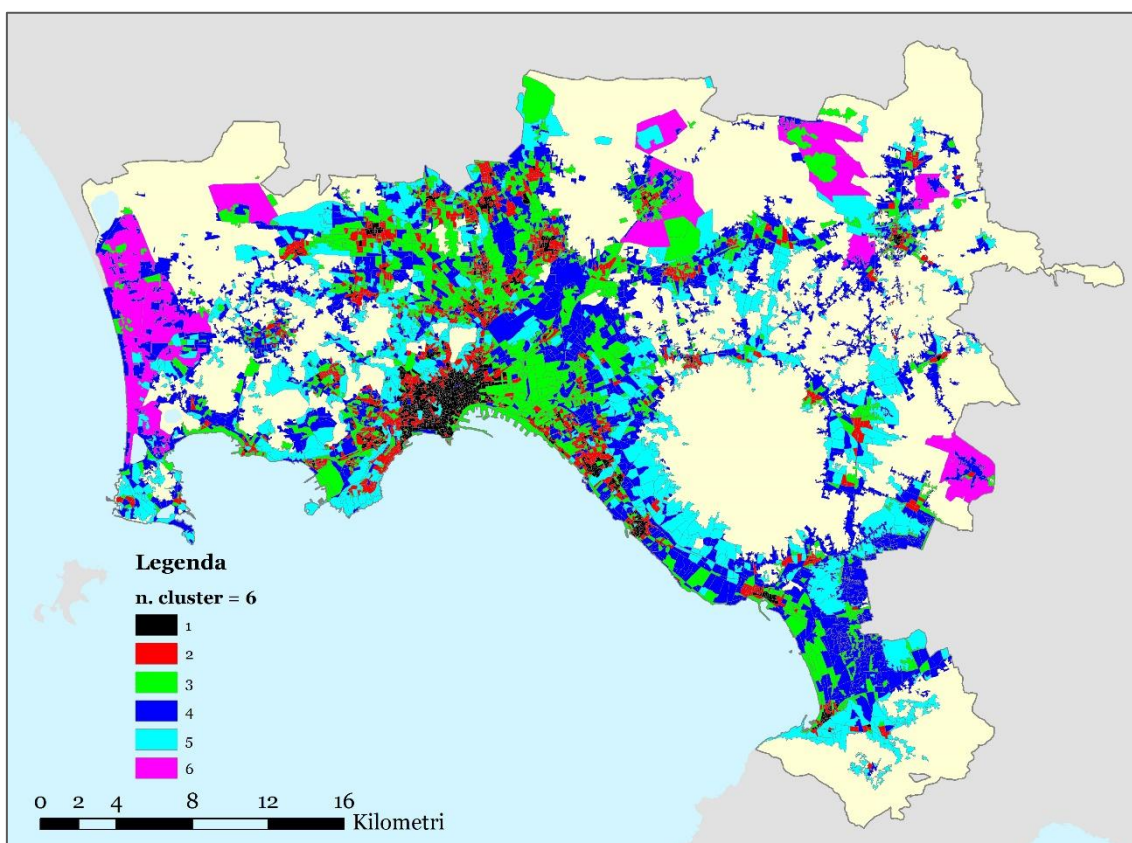


Figura 51 - Risultato della *cluster analysis*.

Mappa dell'uso del suolo agricolo

Le aree *non urbanizzate*, invece, sono state confrontate con la Carta dell'uso agricolo del suolo della Regione Campania e sono state suddivise in 3 classi: *aree rurali*, *aree boscate* (boschi di latifoglie), *rocce affioranti e aree dunali* (Figura 52).

Mappa del Carico Termico – attribuzione dei pesi

Le elaborazioni realizzate ai punti 6 e 7 sono state, infine, unite in una mappa dell'uso del suolo dell'area di studio ed è stato attribuito ad ogni tipologia di uso del suolo un peso WF_{TL} crescente proporzionale alla propensione ad accumulare calore, in base alle caratteristiche morfologiche dei tessuti insediativi per le aree urbanizzate, e alla tipologia di vegetazione per le aree non urbanizzate (Figure 53, 54, Tabella 14). Ai *cluster* con alte densità edilizie, basso SVF, rilevanti rapporti di copertura e di impermeabilizzazione è stato attribuito un peso maggiore di quello ipotizzato per i *cluster* che invece, presentano alti valori di NDVI e delle metriche di configurazione insieme a basse densità edilizie ed alti valori di SVF.

Tabella 13 - Sistema di punteggi attribuiti alle zone della mappa del Carico Termico.

Uso del suolo	WF_{TL}
Cluster 1 - centri storici	7
Cluster 2 - tessuto urbanizzato consolidato	6
Cluster 3 - aree miste a bassa densità/aree industriali	5
Cluster 4 - aree miste a media densità	4
Cluster 5 - tessuto periurbano	3
Cluster 6 - tessuto metaurbano	2
Aree agricole	1
Rocce	0
Boschi	-1

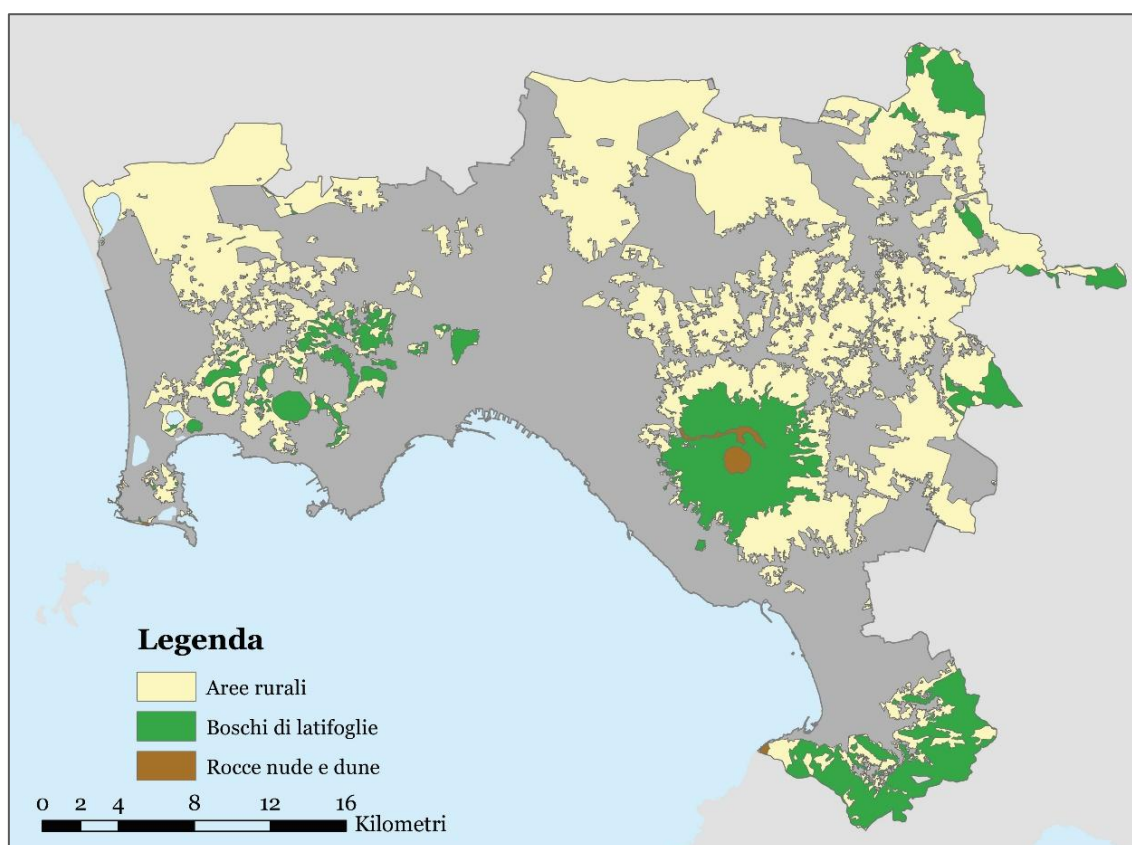


Figura 52 - Uso del suolo delle aree non urbanizzate.

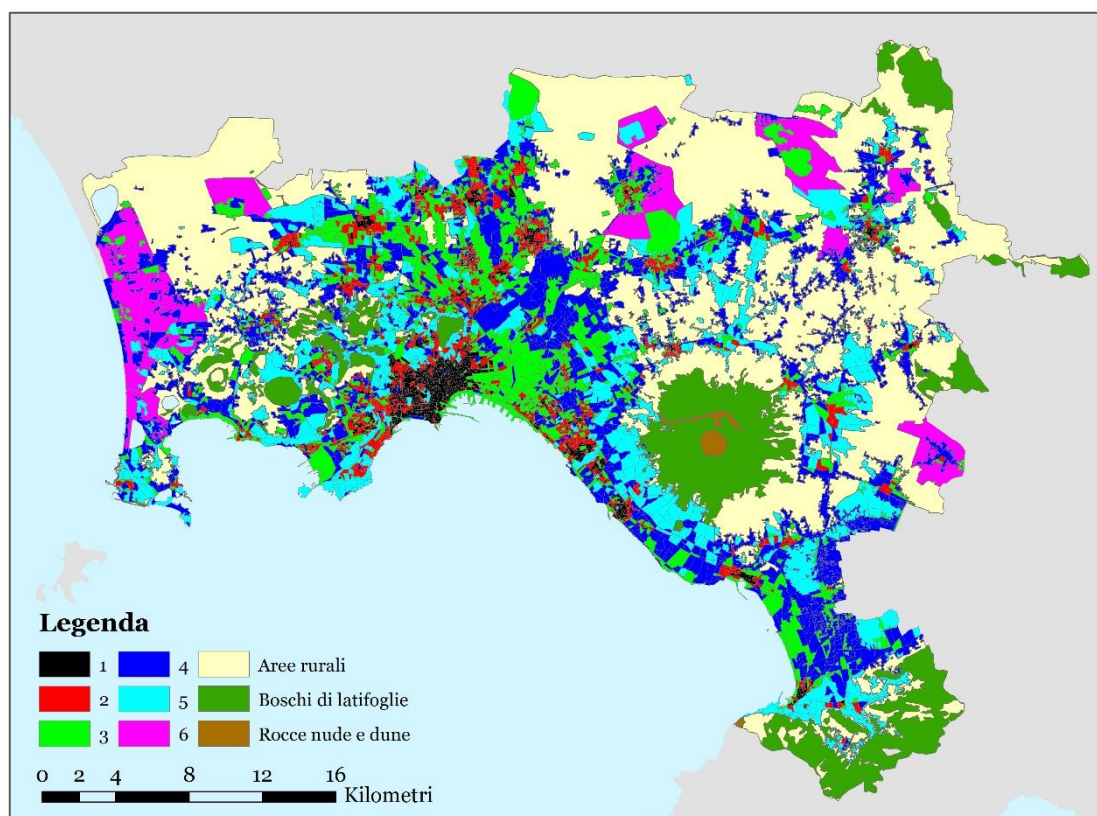


Figura 53 - Mappa di uso del suolo.

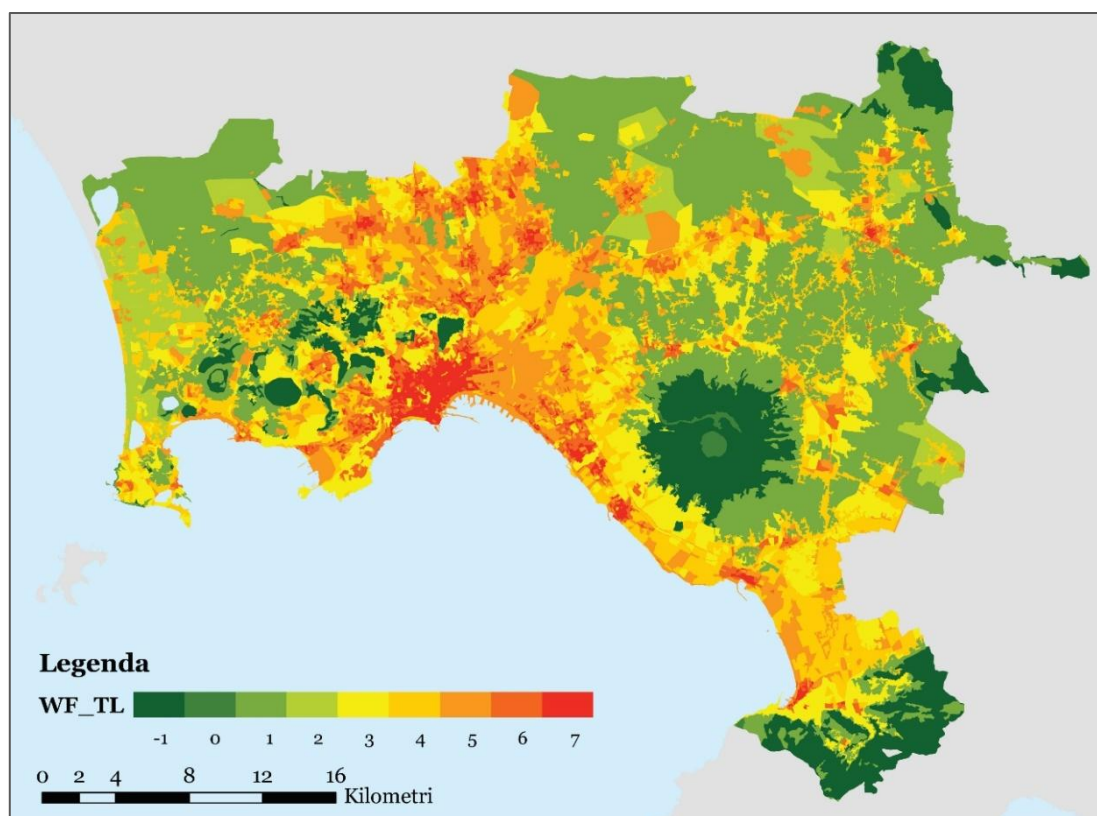


Figura 54 - Rappresentazione dei punteggi WF_{TL} attribuiti alle zone della mappa del Carico Termico.

Al *cluster* 1, costituito dalle sezioni di censimento delle aree storiche delle città e, per la maggior parte, dalle sezioni di censimento del centro storico di Napoli, è stato attribuito il peso più alto (massimo Carico Termico); infatti, sebbene tali aree siano caratterizzate da valori di albedo più alti e da maggiore inerzia termica delle costruzioni, gli alti rapporti di copertura e di impermeabilizzazione e la quasi totale assenza di spazi verdi li rende maggiormente suscettibili allo sviluppo di anomalie termiche.

Mappa del Potenziale Dinamico

La mappa del Potenziale Dinamico è stata ricavata effettuando un *overlay* dei livelli informativi di seguito descritti, ottenuti processando i dati di base in ambiente GIS.

Mappa dei picchi montuosi e delle incisioni vallive

Attraverso una funzione focale di *Neighborhood* è stato filtrato il DTM ad alta risoluzione ($1\text{ m} \times 1\text{ m}$), sostituendo ad ogni *pixel* la media dei *pixel* contenuti in un intorno quadrato di lato 20 m e ottenendo, in tal modo, un trend statistico dell'andamento reale del suolo; il risultato di tale elaborazione è stato sottratto al DTM stesso ricavando una mappatura dei picchi e delle valli, costituenti le aree esposte alla ventilazione rispettivamente in misura maggiore e minore (Figura 55).

Mappa delle pendenze

Applicando al DTM la funzione di *3D-Analyst Slope* è stata elaborata una mappa delle pendenze del suolo che è stata in seguito riclassificata, distinguendo le porzioni di territorio con pendenza inferiore al 20% da quelle con pendenza maggiore; la pendenza ha effetto sulla ventilazione, infatti, soprattutto con venti regionali, strutture urbane a diverse altezze tendono ad essere più permeabili e ciò aumenta il rilascio di calore; inoltre, circolazioni locali termicamente indotte (movimenti d'aria ascendenti e discendenti) possono verificarsi all'interno di aree urbane in pendenza; in sintesi, le aree a forte pendenza, presentando maggiore permeabilità urbana e maggiore capacità

di miscelazione dell'aria, risultano essere meno suscettibili a fenomeni di *stress* termico.

Mappa dell'esposizione al vento

La combinazione delle prime tre elaborazioni attraverso una operazione di *Overlay* ha consentito di ottenere una *mappa dell'esposizione al vento*, in cui sono rappresentate sia le zone dove la maggiore o minore altitudine determina effetti sulla temperatura dell'aria, sia le aree a forte pendenza, più esposte a spostamenti d'aria ascendenti o discendenti (Figura 56).

Prossimità ai grandi spazi aperti

Attraverso l'operazione di analisi spaziale *Buffer*, sono stati individuate le aree contermini alla costa (500 metri), alle sponde dei laghi e ai grandi spazi inedificati (300 metri), al fine di tenere in considerazione l'effetto benefico delle brezze di mare e di terra (Figura 57).

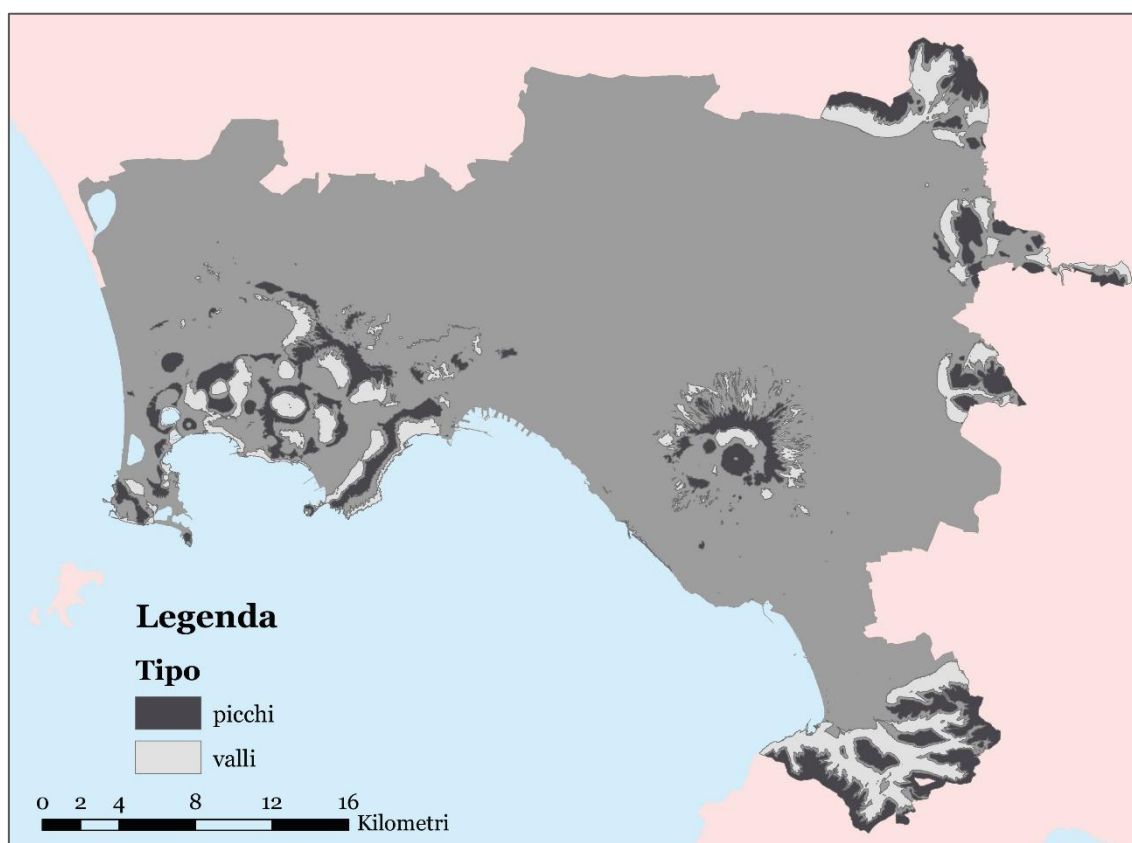


Figura 55 - Mappa dei picchi montuosi e delle incisioni vallive.

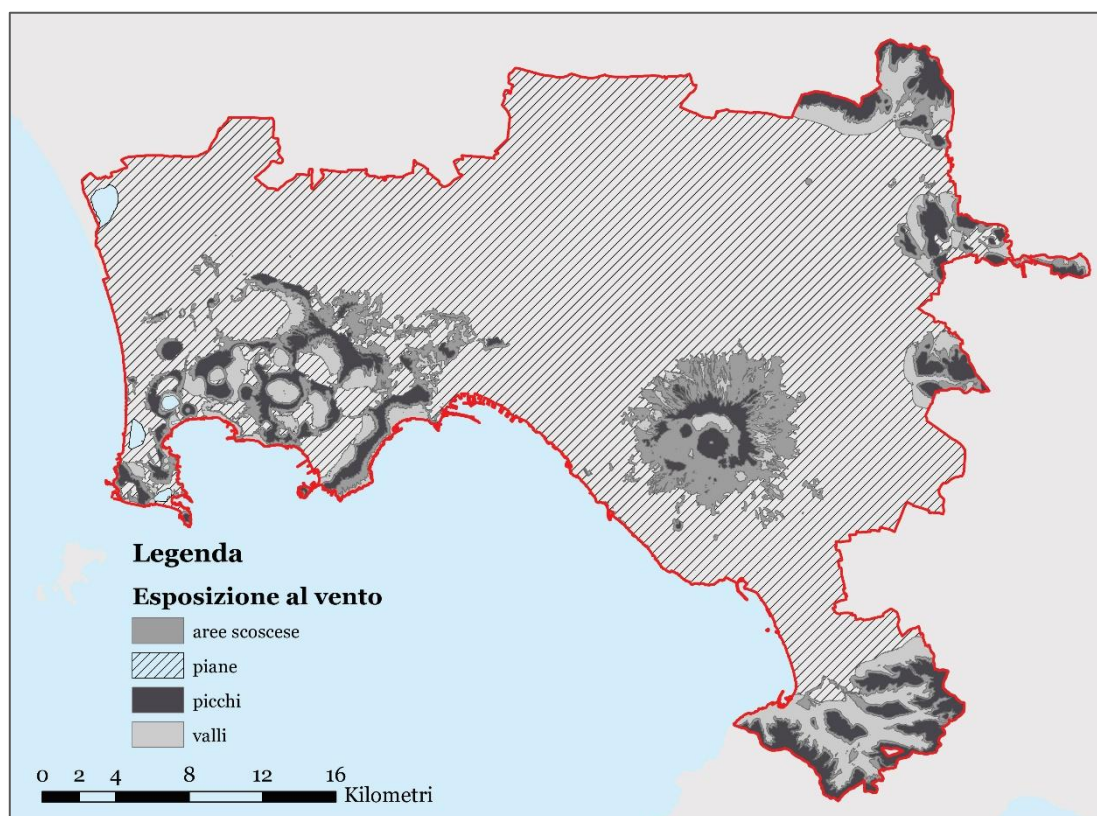


Figura 56 - Mappa dell'esposizione al vento.

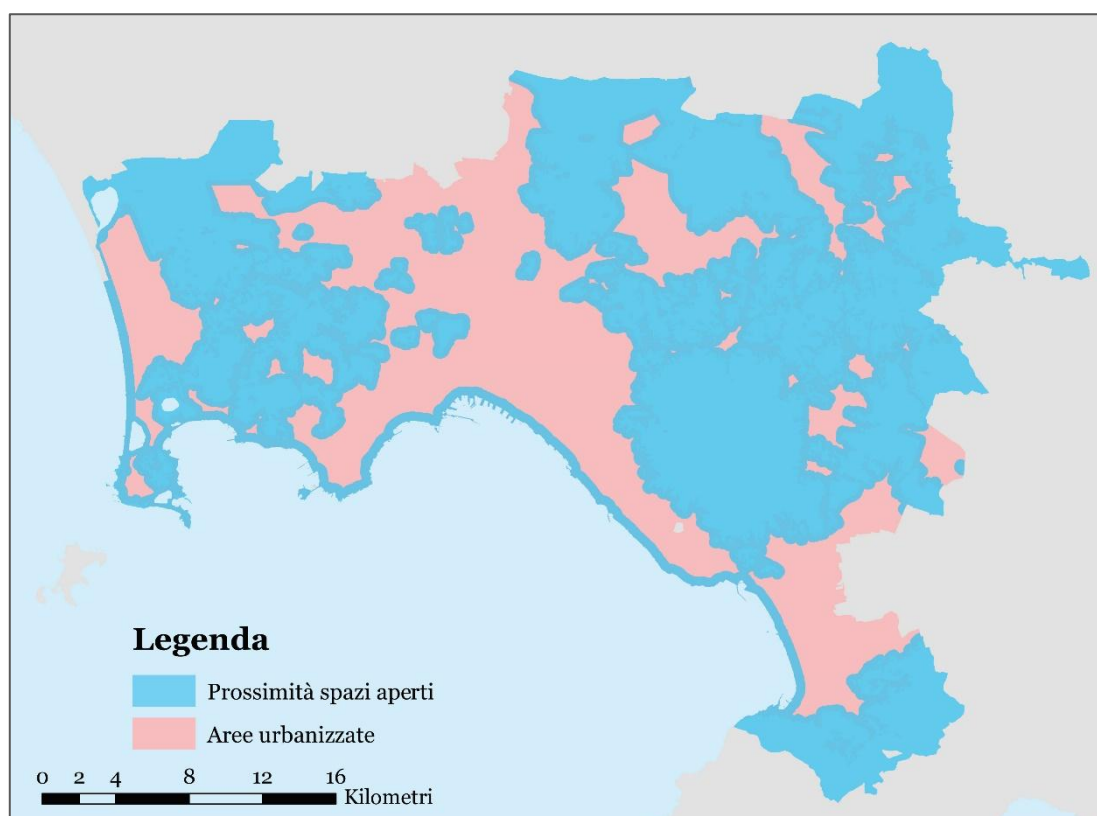


Figura 57 - Mappa della prossimità agli spazi aperti.

Mappa della velocità del vento

Tale elaborazione è stata desunta importando i dati dell'Atlante eolico italiano, recante la mappatura della velocità media annua del vento a 25 m s.l.t./s.l.m.

Essa è stata integrata con dati di letteratura recanti la direzione e la frequenza dei venti principali, relativi a 6 stazioni di rilevamento (Bacoli-Miseno, Pozzuoli-Golfo, Pozzuoli-Anfiteatro, Napoli-Acton, Napoli-Capodichino, Torre Annunziata). Dall'analisi dei suddetti dati è evincibile come parte preponderante dei flussi di vento provenga dal settore sud-ovest, e, in secondo luogo, dal settore nord-est.

Maggiore è l'intensità dei flussi di vento, più marcato sarà l'effetto della ventilazione sulla riduzione del carico termico. Dall'analisi di tale elaborazione si è desunta la presenza di un limite aerodinamico alle spalle della fascia costiera, oltre il quale la velocità media del vento risulta sensibilmente inferiore (< 4 m/s) (Figure 58, 59).

Mappa del potenziale dinamico

La combinazione della mappa dell'esposizione al vento con la mappa della velocità del vento consente, attraverso una operazione di *overlay*, di ricavare la *mappa della ventilazione*, elaborazione sintetica del Potenziale Dinamico; alle aree individuate dall'operazione di *overlay* è stato attribuito un punteggio variabile da 0 (Potenziale Dinamico molto alto) a -7 (Potenziale Dinamico molto basso). Si è attribuito ai picchi e alle aree scoscese il peso corrispondente al massimo potenziale dinamico in quanto tali aree, per conformazione topografica, sono maggiormente esposte ai flussi di vento; il punteggio assegnato si avvicina allo zero (Potenziale Dinamico minimo) per quelle aree che, oltre a presentare una bassa velocità del vento (< 4 m/s), risultano anche distanti dagli spazi aperti e, pertanto, non godono neppure dei benefici delle brezze (Figura 60, Tabella 15).

Tabella 14 - Sistema di punteggi attribuiti alle zone della mappa del Potenziale Dinamico.

Tipo	WF_{DP}
picchi	-7
aree scoscese	-7
piane ventilate in prossimità di spazi aperti	-6
valli ventilate in prossimità di spazi aperti	-5
piane ventilate	-4
piane interne in prossimità di spazi aperti	-3
valli interne in prossimità di spazi aperti	-2
piane interne	-1
valli	0

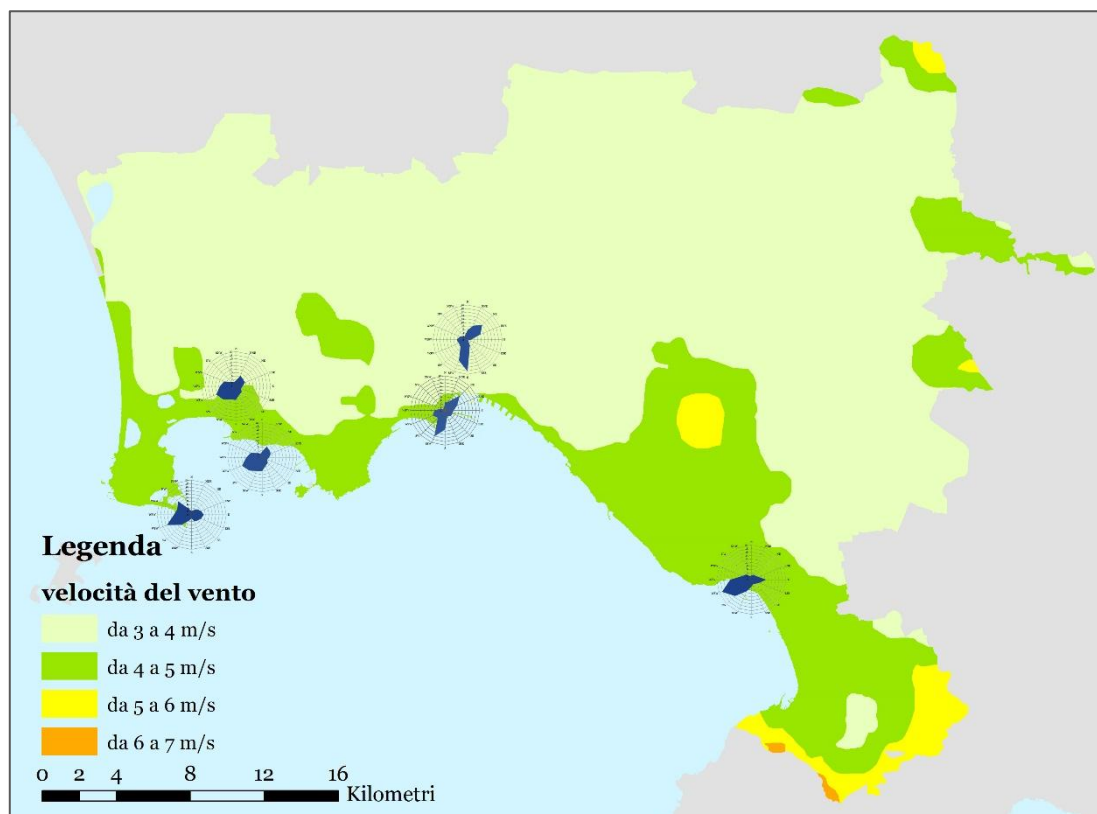


Figura 58 - Mappa della velocità del vento.

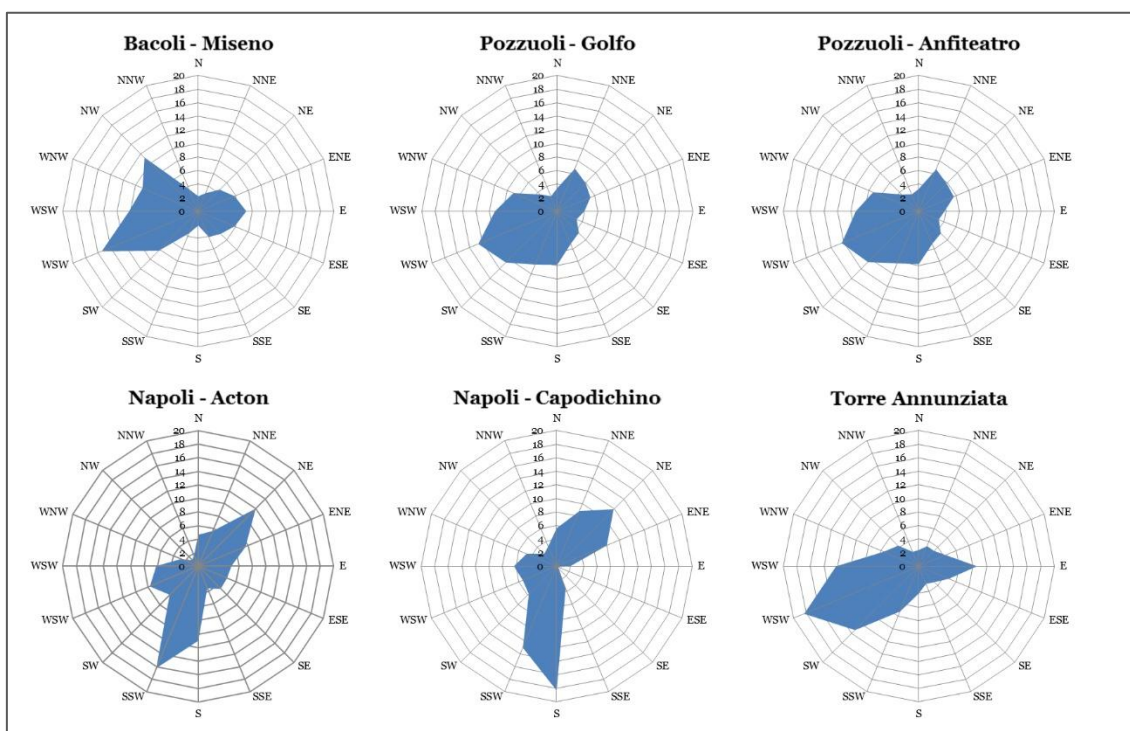


Figura 59 - Direzione prevalente e frequenza dei venti prevalenti in 6 stazioni di rilevamento ubicate all'interno dell'area di studio (it.windfinder.com).

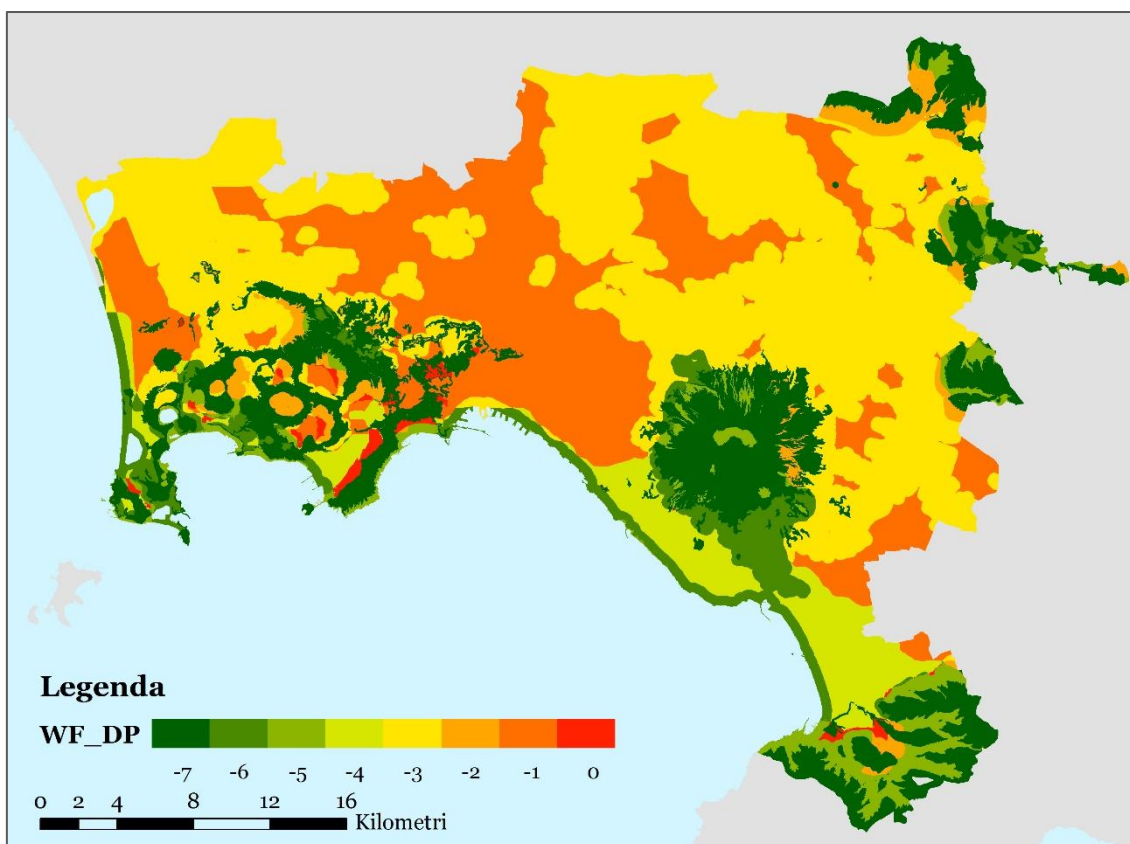


Figura 60 - Mappa del potenziale dinamico con pesi attribuiti alle zone individuate.

CAPITOLO 12 - Mappa dei climatopi

Calibrazione del modello

Attraverso un'operazione di *overlay* tra la mappa del Carico Termico e la mappa del Potenziale Dinamico, si ottiene una *mappa intermedia* che costituisce la base per la calibrazione del modello. Le aree individuate nella suddetta elaborazione sono rappresentative della somma dei punteggi assegnati al Carico Termico e al Potenziale Dinamico; tale somma definisce 16 differenti zone, corrispondenti ai valori di somma compresi tra -8 (minimo Carico Termico e massimo Potenziale Dinamico) e +7 (massimo Carico Termico e minimo Potenziale Dinamico). Secondo quanto previsto dal modello, i suddetti valori dovrebbero essere rappresentativi di una crescente suscettibilità a sviluppare delle anomalie termiche (Figura 61).

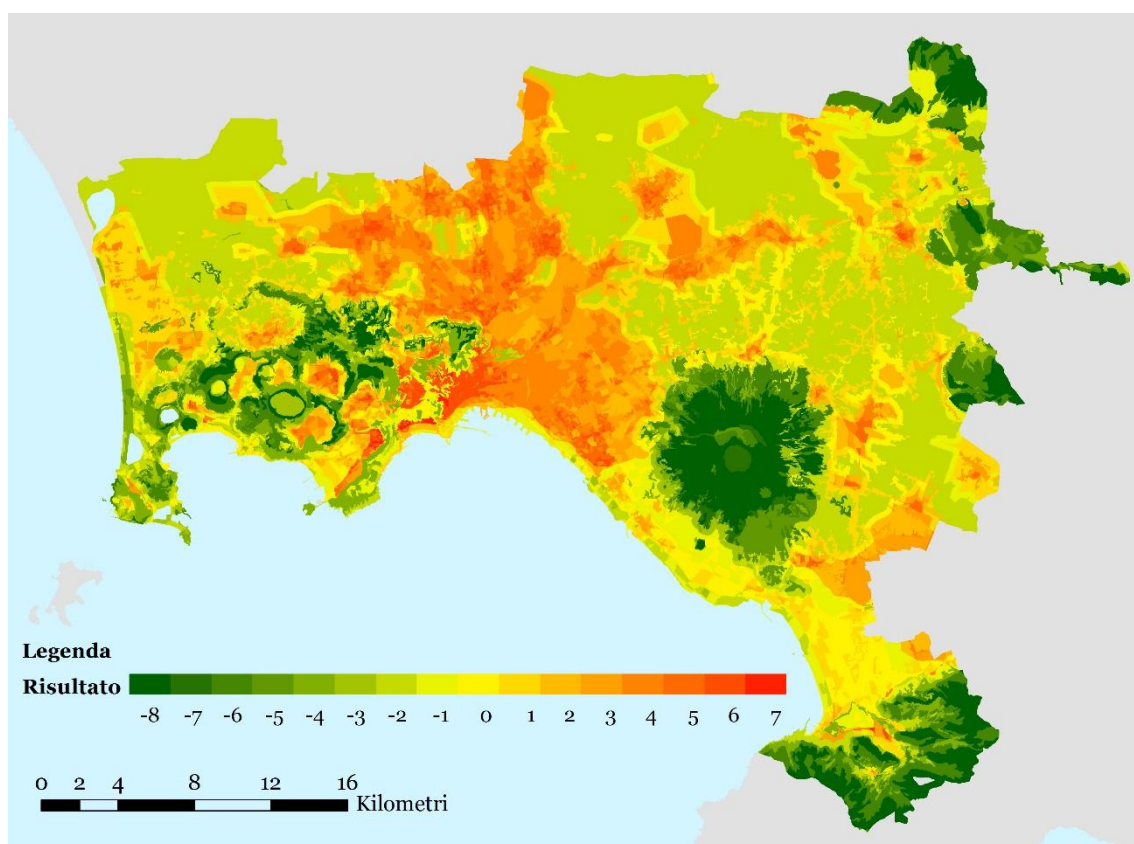


Figura 61 - Mappa della somma dei punteggi delle mappe del Carico Termico e del Potenziale Dinamico.

Ci si aspetta pertanto che vi sia una correlazione diretta tra il valore della temperatura all'interno di tali aree e il risultato dell'*overlay* tra le due mappe di base.

Fase fondamentale della metodologia proposta, dunque, è la calibrazione dei punteggi attribuiti attraverso un confronto tra il risultato della mappa con i dati di temperatura rilevati nell'area metropolitana di Napoli.

La calibrazione è stata effettuata ricorrendo alla termografia del Servizio SIT della Città Metropolitana di Napoli (cfr. Capitolo 9), con riferimento alla sola porzione occidentale dell'area metropolitana. Come, infatti, già accennato in precedenza, la mappa termica è il risultato del processamento di dati di temperatura superficiale, rilevati attraverso un sensore aviotrasportato, durante una campagna di rilievi durata più giorni. La porzione occidentale dell'area metropolitana è stata rilevata in un unico giorno, quello con il massimo soleggiamento e la minore copertura nuvolosa. Le temperature al suolo sono, pertanto, le più intense. Nell'ottica di individuare la suscettibilità alle anomalie termiche, dunque, i dati relativi alla suddetta porzione della termografia risultano essere i più adatti per l'operazione di calibrazione.

Sono state, dunque, selezionate con una *query spaziale* le aree ricadenti nella porzione occidentale dell'area metropolitana, 6119 poligoni, corrispondenti a circa il 52% di tutte le zone presenti nella mappa della somma dei punteggi.

Per tali aree si è calcolata la relativa temperatura media superficiale, valutando la media dei *pixel* delle porzioni di termografia ricadenti all'interno dei poligoni della mappa del risultato attraverso l'impiego dell'applicativo *Gis Geospatial Modelling Environment*, utilizzando la funzione *isectpolyst*.

Si è proceduto escludendo dalla calibrazione i valori anomali, o *outlier*, per ognuna delle 16 classi della mappa del risultato, attraverso il metodo statistico della *Thompson τ modificata*.

Sono state escluse dall'analisi 409 osservazioni pari al 6,7% delle aree selezionate nella parte occidentale dell'area metropolitana.

Le osservazioni sono state inserite in un piano cartesiano avente sulle ascisse la somma tra i pesi assegnati nelle mappe del Carico Termico e del Potenziale Dinamico ($WF_{TL} + WF_{DP}$) e sulle ordinate la temperatura superficiale (LST) misurata in °C (Figura62).

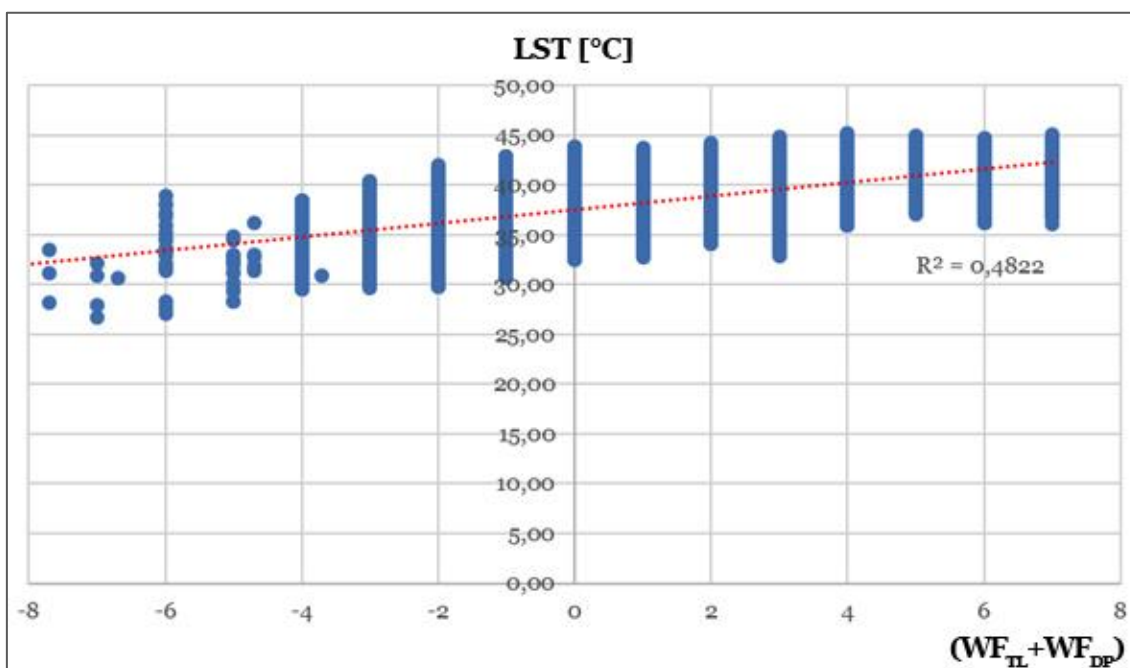


Figura 62 - Rappresentazione delle zone in un piano cartesiano per evidenziare la relazione tra la somma dei punteggi delle mappe del Carico Termico e del Potenziale Dinamico e la temperatura media superficiale (LST) delle zone selezionate nella porzione occidentale dell'area metropolitana.

È stato calcolato il valore del coefficiente di determinazione R^2 , pari nel caso in esame a 0,4822, ed è stata effettuata la calibrazione dei punteggi assegnati nelle mappe del Carico Termico WF_{TL} e del Potenziale Dinamico WF_{DP} , impostando come funzione obiettivo la massimizzazione di R^2 .

Alla fine del processo di calibrazione, che ha determinato una sensibile modifica dei punteggi, il coefficiente di determinazione R^2 massimo ottenibile è risultato essere pari a 0,5475, corrispondente a un coefficiente di Pearson pari a 0,74 (Tabelle 15,16, Figure 63, 64).

Il modello così calibrato è in grado di spiegare con maggiore precisione la suscettibilità di un particolare tessuto alle anomalie termiche.

I punteggi ottenuti dalla calibrazione sono stati riassegnati alle tipologie di aree delle rispettive mappe di base e si è provveduto, dunque, a realizzare una nuova mappa classificata in base alla somma dei punteggi suddetti che costituirà la base informativa per la successiva fase di individuazione dei climatopi (Figura 65).

Tabella 15 - Sistema di punteggi calibrati attribuiti alle zone della mappa del Carico Termico.

Uso del suolo	WF_{TL}
Cluster 1 - centri storici	7,4
Cluster 2 - tessuto urbanizzato consolidato	7
Cluster 3 - aree miste a bassa densità/aree industriali	6,6
Cluster 4 - aree miste a media densità	4
Cluster 5 - tessuto periurbano	2,6
Cluster 6 - tessuto metaurbano	-0,4
Aree agricole	2,3
Rocce	-3,7
Boschi	-1,7

Tabella 16 - Sistema di punteggi calibrati attribuiti alle zone della mappa del Potenziale Dinamico.

Tipo	WF_{DP}
Picchi	-3,7
Aree scoscese	-3,3
Piane ventilate in prossimità di spazi aperti	-3
Valli ventilate in prossimità di spazi aperti	-2,2
Piane ventilate	-1
Piane interne in prossimità di spazi aperti	-0,5
Valli interne in prossimità di spazi aperti	-0,3
Piane interne	0,4
Valli	0

Individuazione dei climatopi

Operazione decisiva del terzo *step* della metodologia è l'identificazione dei *climatopi*. Essi sono stati individuati con un'operazione di *overlay* tra le mappe del Carico Termico e del Potenziale Dinamico, calibrate nella fase precedente con nuovi punteggi. È stata, in seguito, calcolata la somma dei punteggi delle due mappe di partenza e sono state individuate aree con omogenei valori del Carico Termico e del Potenziale Dinamico.

I climatopi sono stati, inoltre caratterizzati indicando il tipo di impatto sul *comfort* termico. Ognuno dei 9 climatopi individuati è oggetto di differenti prescrizioni nella UC-ReMap in cui sono anche identificate: le zone da

preservare, in quanto aree di produzione di aria fresca; le zone di attenzione, costituite dalle aree in cui, a causa di un modesto Potenziale Dinamico è necessario valutare l'opportunità di interventi di nuova edificazione; le aree in cui si rendono necessarie specifiche azioni di raffrescamento e di favoreggiamento della ventilazione (Figura 66, Tabella 17).

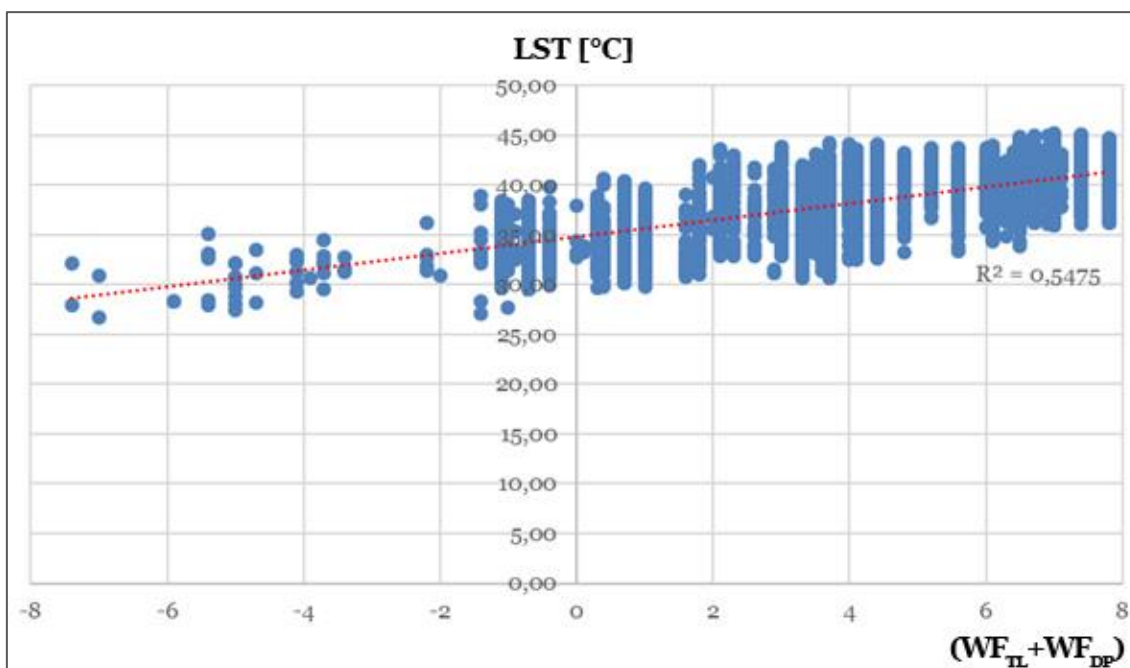


Figura 63 - Rappresentazione del nuovo set di dati con i punteggi calibrati, in maniera tale da massimizzare il coefficiente di determinazione R^2 .

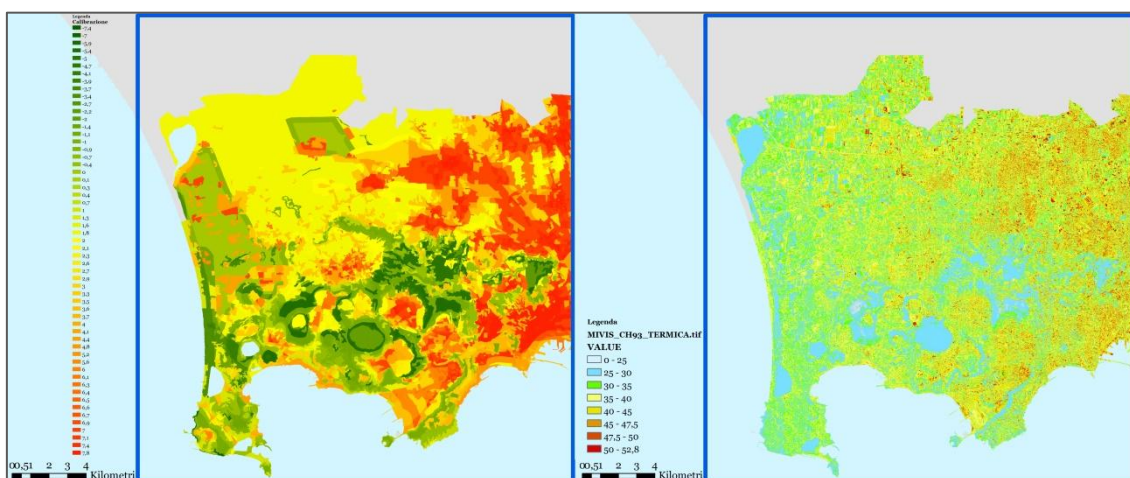


Figura 64 - Confronto fra la termografia e il sistema dei punteggi calibrati per le aree della porzione occidentale dell'area metropolitana di Napoli.

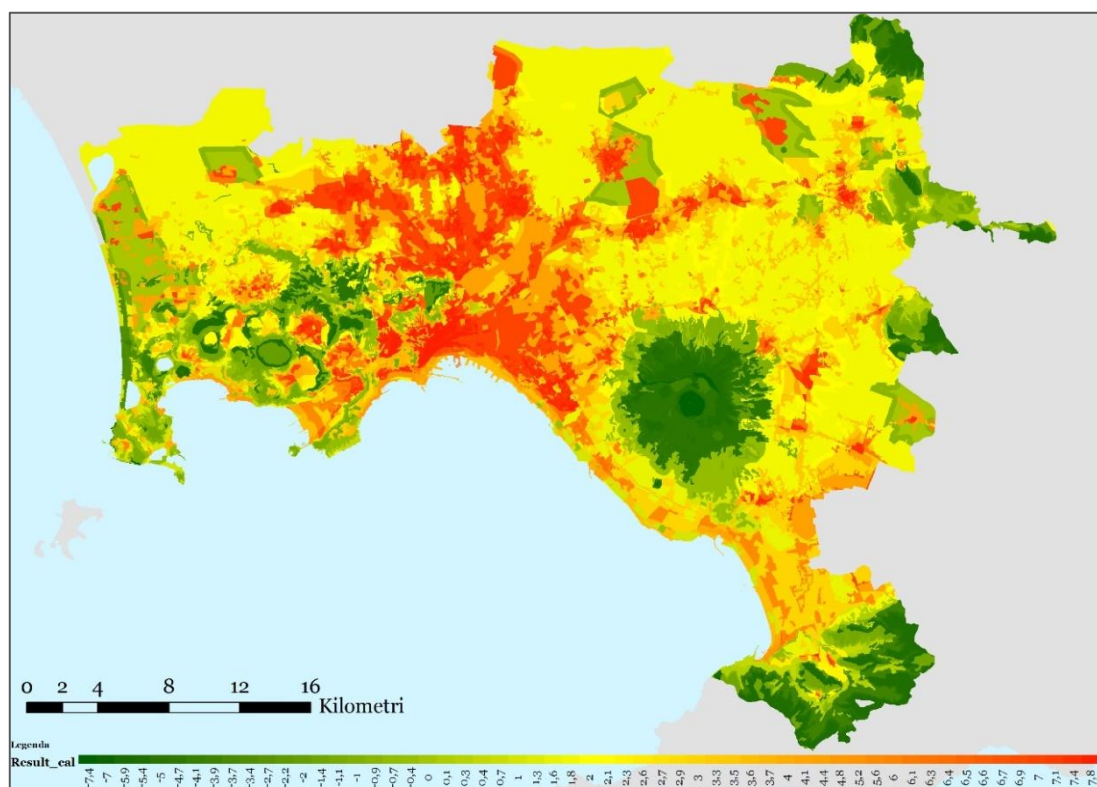


Figura 65 - Mappa della somma dei punteggi calibrati delle mappe del Carico Termico e del Potenziale Dinamico.

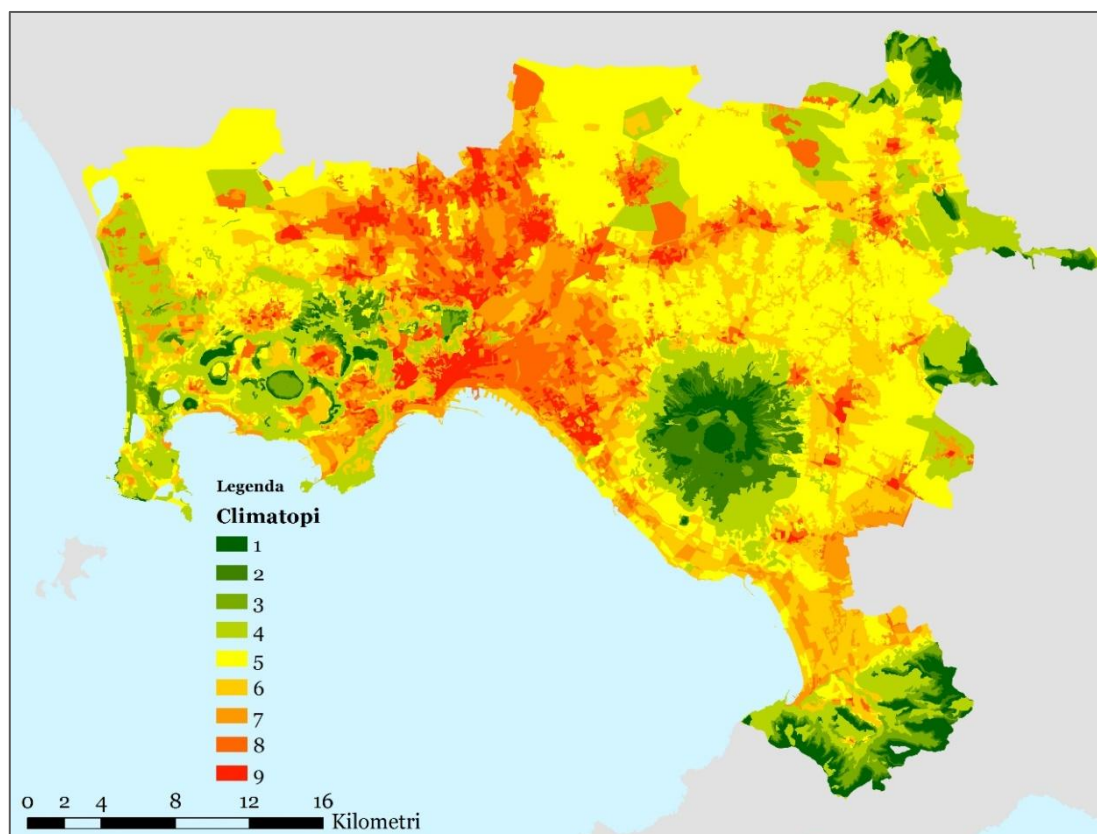


Figura 66 - Mappa dei climatopi.

Tabella 17 - Criterio per l'individuazione dei climatopi a seconda del punteggio ottenuto dalla somma dei punteggi delle mappe del Carico Termico e del Potenziale Dinamico.

Punteggio	Climatopo	Descrizione	Impatto sul comfort termico	Azioni strategiche
$-7,4 \leq \Sigma < -5$	1	TL negativo DP elevato	●●●● Alto	Conservazione
$-5 \leq \Sigma < -3,9$	2	TL negativo DP alto	●● Moderato	
$-3,9 \leq \Sigma < -1,4$	3	TL negativo DP medio	● Debole	Conservazione e miglioramento
$-1,4 \leq \Sigma < 1$	4	TL basso DP alto	- Neutrale	
$1 \leq \Sigma < 2,1$	5	TL moderato DP moderato	● Debole	Aree da attenzione
$2,1 \leq \Sigma < 4,1$	6	TL moderato DP moderato	●● Moderato	
$4,1 \leq \Sigma < 6,1$	7	TL alto DP basso	●●● Discretamente alto	Azioni auspicabili e consigliate
$6,1 \leq \Sigma < 7,1$	8	TL alto DP molto basso	●●●● Alto	
$7,1 \leq \Sigma \leq 7,8$	9	TL elevato DP molto basso	●●●●● Molto alto	Azioni necessarie e prioritarie

CAPITOLO 13 - Mappa per l'adattamento climatico al fenomeno delle alte temperature

Aspetti metodologici e possibili impieghi

Una mappa per l'adattamento ai cambiamenti climatici rappresenta una elaborazione di sintesi delle strategie di pianificazione da perseguire per incidere sul clima urbano al fine di attenuare fenomeni specifici come, ad esempio, le anomalie termiche. Essa definisce strategie di intervento per ogni climatopo, principalmente operanti sul controllo di parametri quali il volume e la superficie coperta dell'edificato, l'altezza media, l'ubicazione e l'orientamento degli edifici, la localizzazione degli spazi verdi. Tale elaborazione, inoltre, contiene indicazioni circa le aree con maggiori funzioni di rilevanza climatica (aree ad alta naturalità, percorsi di ventilazione, etc.) in cui arginare il consumo di suolo e/o le aree con minore rilevanza climatica in cui concentrare eventuali ipotesi di trasformazione urbanistica.

Sulla scorta dei risultati delle analisi condotte per la redazione della mappa dei climatopi, la mappa per l'adattamento al *climate change* è stata ottenuta per aggregazione di climatopi simili, con lo scopo di identificare zone con differenti suscettibilità dal punto di vista climatico e per le quali sono da mettere in essere azioni aventi natura e priorità differenti (Figura 67, Tabella 17).

Tali zone identificano, in altre parole, le aree del territorio in cui è necessario programmare azioni di conservazione ovvero interventi di modifica dell'ambiente costruito, o ancora una insieme calibrato di entrambe le strategie.

Il ruolo di una mappa per l'adattamento è, dunque, quello di costituire una piattaforma informativa in grado di supportare il pianificatore in determinate scelte.

Una mappa per l'adattamento ai cambiamenti climatici, così come configurata nella presente applicazione, risulta impiegabile in numerose fasi del processo di pianificazione.

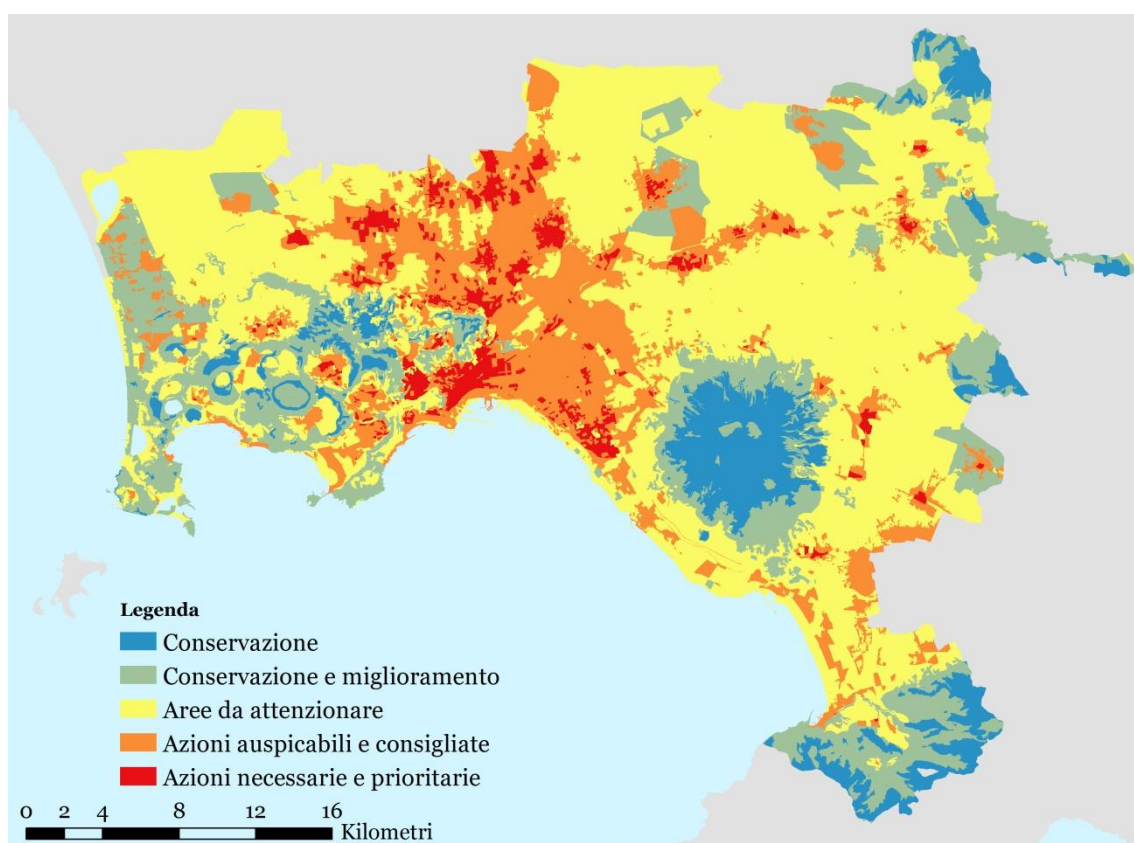


Figura 67 - Mappa per l'adattamento ai cambiamenti climatici; tale elaborazione, attraverso cui individuare, le aree da assoggettare a determinate strategie, deve essere corredata di un sistema di scelta degli interventi prioritari da mettere in essere.

Essa potrebbe, innanzitutto, consentire di verificare l'opportunità o meno di determinate scelte localizzative (ad esempio, nuovi insediamenti residenziali o produttivi) in base alla suscettibilità dal punto di vista climatico.

Per ciascuna zona della mappa è possibile, inoltre, definire le configurazioni morfologiche più performanti da adottare in caso di nuovi insediamenti o quali caratteristiche dell'ambiente urbano modificare nel caso di interventi di rigenerazione urbana o di ristrutturazione urbanistica di ambiti consolidati.

Se considerata a scala più ampia, la mappa di adattamento risulta un valido strumento per la verifica della sostenibilità degli strumenti di governo del territorio e potrebbe rappresentare un utile livello informativo nella valutazione ambientale strategica dei piani urbanistici e territoriali.

In ultimo, la mappa di adattamento, offrendo una sintesi delle caratteristiche del clima urbano del territorio analizzato, consente di individuarne le principali

criticità e, pertanto, di indirizzare la selezione di un *set* di azioni virtuose per l'attenuazione dei fenomeni esaminati.

A tal riguardo, nel prosieguo del presente Capitolo, è presentata una metodologia di scelta delle azioni prioritarie da mettere in essere per perseguire l'adattamento di un ambito territoriale alle alte temperature.

Selezione delle azioni prioritarie per l'adattamento alle alte temperature

La fase di transizione tra una UC-AnMap e una UC-ReMap rappresenta una fase delicata del generale processo di redazione di una UC-Map in quanto la stessa determina la trasformazione dei risultati di una complessa fase di analisi, in cui convergono numerose ed eterogenee elaborazioni, in un insieme di indicazioni per la pianificazione urbanistica, sviluppato con l'obiettivo di mitigare le condizioni negative e preservare gli aspetti positivi (Ren, 2015).

Così come avviene per le UC-AnMap, la cui metodologia di redazione è fortemente influenzata dalle basi di dati a disposizione e dalla risoluzione della mappa stessa, anche per la produzione delle UC-ReMap la comunità scientifica ha prodotto, ad oggi, numerosi e differenti metodi. Il passaggio dai climatopi alle azioni di intervento di natura urbanistica, pertanto, non è univoco e va conformato alla UC-AnMap di input e al livello di dettaglio delle azioni stesse.

Dalla consultazione della letteratura scientifica in materia, inoltre, è rilevabile come le raccomandazioni contenute in una UC-ReMap si limitino prevalentemente ad un unico insieme, spesso poco dettagliato, di azioni e come le medesime raccomandazioni contemplino raramente una classificazione delle azioni stesse in ragione del grado di priorità. Priorità che è determinata, da un lato, dal livello di efficacia dell'azione e, dall'altro, dalla fattibilità dell'azione in relazione al contesto urbanistico della stessa area.

Per consentire la classificazione del livello di priorità delle azioni da includere nella mappa per l'adattamento al *climate change*, è stata implementata una metodologia di valutazione basata sulla compilazione di matrici, di seguito esplicitata.

Lo schema metodologico proposto prevede tre fasi principali. La prima contempla la redazione della tabella degli interventi e la stima dell'efficacia degli stessi. La seconda fase, invece, consiste nella valutazione della fattibilità e della coerenza delle azioni con riferimento alle caratteristiche della zona climatica presa in esame. La terza ed ultima fase prevede una stima conclusiva della priorità degli interventi.

La metodologia è stata testata sul Climatopo 9 dell'area metropolitana di Napoli ed i risultati sono riportati in Appendice.

Stima dell'efficacia degli interventi

Il principale scopo delle strategie di intervento e delle raccomandazioni per la pianificazione urbanistica contenute in una mappa per l'adattamento al *climate change* è quello di addivenire ad una modifica delle caratteristiche degli insediamenti urbani ovvero una conservazione di particolari condizioni del territorio, così da garantire una diminuzione del Carico Termico e un incremento del Potenziale Dinamico di una determinata zona climatica.

Una positiva variazione delle suddette grandezze consente di attenuare la suscettibilità di una determinata zona all'insorgenza del fenomeno dell'UHI e gli interventi volti a diminuirne l'intensità si inquadrano in una più ampia strategia di adattamento delle città ai cambiamenti climatici.

Sono numerosi gli esempi, a vari livelli istituzionali di governo, di processi virtuosi per l'attivazione di politiche di adattamento ai cambiamenti climatici.

L'Unione Europea, ad esempio, ha adottato, nel giugno 2013 la *Strategia europea di Adattamento al Cambiamento Climatico*, mentre nel novembre 2014 il Ministero dell'Ambiente Italiano ha redatto, con il coordinamento scientifico del Centro Euro-Mediterraneo sui cambiamenti climatici, la *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici*, documento in cui è fornita visione strategica nazionale su come affrontare gli impatti dei cambiamenti climatici e rappresenta un quadro di riferimento per l'adattamento per le Regioni e le municipalità. Tra le altre iniziative degne di nota, si segnalano le già citate attività del *Cities Climate Leadership Group*, meglio conosciuto come C40, *network* di 40 grandi aree metropolitane orientata allo sviluppo e alla realizzazione di politiche di contrasto al cambiamento climatico e alla

divulgazione delle *best practice* messe in essere dalle città nei piani locali di adattamento (cfr. Capitolo 3).

Le azioni che configurano una strategia di adattamento al cambiamento climatico sono di varia natura ed una eventuale messa in pratica delle stesse potrebbe garantire effetti multipli. Tali azioni, inoltre, si riferiscono a differenti scale di intervento e possono prevedere modifiche dell'ambiente costruito ovvero contemplare criteri per la pianificazione e la progettazione di nuovi insediamenti urbani, o ancora limitarsi a misure di gestione delle risorse territoriali.

Per l'implementazione delle azioni da includere nella mappa per l'adattamento, sono state selezionati gli interventi di natura urbanistica di contrasto al fenomeno dell'isola di calore urbana contemplati dalla Strategia Nazionale per l'Adattamento ai Cambiamenti Climatici e/o contenuti nel *report* del C40 dal titolo *100 solutions for climate action in cities*, o nei piani di adattamento al cambiamento climatico, citati dal *report* stesso, focalizzati sulla riduzione dell'isola di calore urbana (*City of Sidney Climate Risk and Adaptation Project Report*; *City of Melbourne Climate Change Adaptation Strategy*).

Alle suddette azioni sono stati applicati tre ordini di classificazioni.

La prima classificazione riguarda la scala di intervento e i relativi strumenti di pianificazione urbanistica e territoriale all'interno dei quali gli interventi dovrebbero essere assunti:

- a) Area vasta (Piano territoriale di coordinamento provinciale, Piano paesaggistico, Piano del Parco; etc.)
- b) Ambito urbano (Piano urbanistico comunale);
- c) Quartiere (Piani attuativi);
- d) Isolato (Regolamento edilizio urbanistico comunale);
- e) Edificio (Regolamento edilizio urbanistico comunale);

La seconda classificazione, invece, è orientata a suddividere le azioni in base a quale sia, tra gli aspetti che determinano condizioni di comfort termico, quello interessato dall'azione stessa:

- 1) Albedo;
- 2) Vegetazione;
- 3) Ombreggiatura;

4) Ventilazione;

6) Temperatura degli spazi urbani;

L'ultima classificazione, infine, è operata considerando se l'azione si riferisce ad interventi su edifici ed elementi urbani esistenti, se è valida sia per l'esistente che per la nuovi insediamenti, o ancora se riguarda criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per soli nuovi insediamenti.

In una fase successiva, si è operata una valutazione dell'efficacia di ogni singola azione, relativamente alla capacità di incidere sia sull'attenuazione del Carico Termico, sia sull'incremento del Potenziale Dinamico, attribuendo un punteggio pari a 0 per le azioni non efficaci, a 1 per quelle moderatamente efficaci, e a 2 per le azioni pienamente efficaci.

La somma dei punteggi dell'efficacia relativa al Carico Termico e al Potenziale Dinamico restituisce un valore dell'efficacia globale della misura.

I suddetti punteggi, dovranno poi essere calibrati nella fase successiva in ragione dell'area climatica analizzata. Ad esempio, se in essa le condizioni di *stress* termico sono determinate da elevato carico termico piuttosto che da un basso potenziale dinamico, all'attenuazione del carico termico sarà attribuito un punteggio doppio rispetto all'incremento del potenziale dinamico.

Stima della fattibilità in relazione alle caratteristiche urbanistiche

La seconda fase contempla una stima della fattibilità e della coerenza delle azioni con riferimento alle caratteristiche urbanistiche della zona climatica presa in esame. È facilmente intuibile che talune strategie di intervento non sarebbero applicabili in determinati contesti, in particolare a tessuti insediativi consolidati, in quanto consisterebbero in un totale stravolgimento dell'assetto urbano, oppure, seppur realizzabili potrebbero essere adottate solo in alcune porzioni dell'ambito analizzato.

Pertanto, alle strategie sarà attribuito un punteggio nullo in caso di incoerenza o di non fattibilità rispetto al contesto urbanistico di riferimento, pari a 1 in caso di fattibilità solo parziale e pari a 2 in caso di piena fattibilità.

In Appendice è riportata la stima della fattibilità per il Climatopo 9, contraddistinto da Carico Termico elevato e Potenziale Dinamico molto basso. Tale climatopo corrisponde alle aree con caratteristiche proprie di un centro

storico (alta densità edilizia, alto rapporto di copertura, limitata presenza di spazi verdi), ubicati in aree soggette a bassa ventilazione.

Stima della priorità degli interventi

L'ultima fase, infine, prevede la stima della priorità degli interventi da mettere in essere. Il livello di priorità è calcolato come prodotto tra la somma dei punteggi relativi al grado di efficacia ed il punteggio assegnato per valutare il grado di fattibilità/coerenza di ogni singola azione:

$$P = [E(TL) + E(DP)] \times F$$

dove:

P è il livello di priorità dell'azione;

$E(TL)$ è il punteggio assegnato relativo al grado di efficacia dell'azione nella attenuazione del Carico Termico;

$E(DP)$ è il punteggio assegnato relativo al grado di efficacia dell'azione nell'incremento del Potenziale Dinamico;

F è il punteggio assegnato relativo al grado di fattibilità/coerenza dell'azione.

Nella valutazione dell'efficacia delle azioni per l'area in esame, essendo le condizioni di Carico Termico e di Potenziale Dinamico ugualmente gravose, si è attribuito il medesimo peso a $E(TL)$ e a $E(DP)$.

I punteggi ottenuti sono stati riclassificati, attribuendo ai valori ricadenti nei seguenti intervalli un valore qualitativo del livello di priorità:

$0 \leq P < 2$	→	<i>AZIONE NON FATTIBILE/NON COERENTE;</i>
$2 \leq P < 4$	→	<i>BASSO;</i>
$4 \leq P < 6$	→	<i>MEDIO;</i>
$6 \leq P \leq 8$	→	<i>ALTO;</i>

CONCLUSIONI

L'elaborato di tesi ha inteso fornire un contributo operativo alla quanto mai attuale tematica dell'adattamento ai cambiamenti climatici.

Il cambiamento climatico è un problema cogente, i cui effetti futuri vanno combattuti con politiche territoriali da mettere in essere già da ora, a tutti i livelli di *governance*, dalle strategie di adattamento nazionali ai regolamenti edilizi comunali.

Le città rappresentano dei sistemi estremamente vulnerabili agli impatti che il *climate change* determinerà nei prossimi decenni. E sebbene il tema dell'adattamento della città ai cambiamenti climatici sia oggetto di discussione da parte della comunità scientifica già da alcuni anni, non esistono strumenti condivisi o procedure codificate attraverso cui implementare piani di adattamento al cambiamento climatico.

Si consideri, inoltre, che le città sono anche chiamate ad affrontare sfide di cruciale importanza per la vivibilità delle comunità insediate, quali il rinnovo del patrimonio edilizio esistente e il governo delle trasformazioni urbane, con una sempre maggiore attenzione agli aspetti ecologico-ambientali e alla limitazione del consumo di suolo. Risulta, pertanto, urgente e necessario definire protocolli operativi, indicatori sintetici, parametri, soglie quantitative, per consentire di affrontare, nell'ambito dei processi di governo del territorio, le complesse questioni dell'adattamento delle aree urbane.

Dalla consultazione delle strategie di adattamento a vari livelli istituzionali e di esperienze condotte in alcune importanti aree metropolitane si è constatato come la previsione delle azioni volte all'incremento della capacità adattativa delle città, con particolare riferimento al fenomeno delle alte temperature, sia spesso condotta senza una opportuna conoscenza delle relazioni intercorrenti tra il clima urbano e le caratteristiche del territorio capaci di influenzarlo.

La forma degli insediamenti urbani ha un ruolo accertato sull'alterazione del clima delle città e sono molteplici gli aspetti della morfologia urbana che hanno mostrato avere con l'incremento della temperatura dei nessi, nella maggior parte dei casi formalizzati attraverso relazioni empiriche. Pur tuttavia, negli studi e nelle ricerche in tema di mappatura del clima urbano, la forma e le

caratteristiche dei tessuti urbani sono spesso solo marginalmente considerate ovvero la loro descrizione è affidata ad un numero limitato di indicatori, incapace di descrivere la complessità spaziale di ambiti urbani eterogenei, come quelli ritrovabili nelle città europee.

A tal riguardo, il lavoro di tesi propone una metodologia operativa per la redazione di una mappa per l'adattamento ai cambiamenti climatici che, tenendo in debita considerazione i molteplici aspetti che legano le caratteristiche del territorio, urbanizzato e non, alla variazione dei fattori climatici, riesca a definire modalità di intervento risolutive delle problematiche rilevate.

La metodologia proposta le procedure attualmente in uso nelle tecniche di mappatura del clima urbano, introducendo la lettura dei tessuti insediativi che per le loro caratteristiche morfologiche sono in grado di inibire i naturali processi di raffrescamento. Quanto proposto nel lavoro di ricerca intende superare i tradizionali meccanismi di analisi, valutando la morfologia urbana attraverso un set di indicatori capaci di descrivere i fattori che influenzano il clima urbano, tra cui le metriche di *landscape ecology* per individuare la configurazione e la distribuzione dei servizi ecosistemici all'interno delle aree urbanizzate.

La metodologia proposta, applicata nel corso del lavoro di tesi al caso studio dell'area metropolitana di Napoli, è stata costruita ipotizzandone l'applicazione anche a contesti urbanistici dissimili e in presenza di differenti *set* di dati di base.

Gli output della metodologia rappresentano elaborazioni valide per un approccio realmente sostenibile alla pianificazione e al governo del territorio.

La mappa dei climatopi, ad esempio, potrebbe rappresentare uno dei quadri conoscitivi dei piani territoriali di coordinamento e/o degli strumenti urbanistici comunali e un utile strumento per valutare le *performance* degli stessi per quanto concerne la sostenibilità del progetto di assetto del territorio, della localizzazione delle aree di espansione o di progetti di riqualificazione urbana, identificando le migliori caratteristiche della morfologia del costruito da adottare per garantire il minimo impatto sul clima urbano.

La mappa di adattamento, inoltre, dovrebbe costituire un livello informativo necessario per la redazione della normativa d'attuazione dei piani urbanistici generali e attuativi e dei Regolamenti urbanistici edilizi comunali, e per la selezione di interventi virtuosi da mettere in essere per perseguire l'adattamento della città ai cambiamenti climatici.

Per quanto attiene ai possibili sviluppi futuri della ricerca, si ritiene utile sviluppare, all'interno del processo metodologico di costruzione delle mappe per l'adattamento, anche ulteriori livelli informativi descrittivi di altri gravi effetti del *climate change* sulle città quali allagamenti e smottamenti dovuti a piogge intense, periodi di gelo o di siccità. Indubbiamente, il gap tecnico-informativo da colmare tra climatologia urbana e pianificazione urbanistica impone lo sviluppo di ricerche multidisciplinari tese a definire modelli implementabili con dati facilmente utilizzabili dai pianificatori.

È necessario, inoltre, orientare gli sforzi della ricerca verso la costruzione di modelli gerarchici integrati per la mappatura del clima urbano che possano andare incontro alle specifiche necessità delle numerose scale di pianificazione urbanistica e territoriale esistenti.

APPENDICE - Esempio di selezione delle strategie prioritarie

Tabella A – Selezione degli interventi e valutazione della loro efficacia rispetto al contesto climatico del Climatopo 9.

<ul style="list-style-type: none">●● azione efficace● azione moderatamente efficace○ azione non efficace		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti		Efficacia rispetto al contesto climatico	
		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare			
		criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti			
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	Attenuazione del TL	Incremento del DP
Area Vasta	Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP), Piano paesaggistico (PP), Piano del Parco (PDP)	Vegetazione	Protezione e rafforzamento dei corridoi ecologici: incremento della vegetazione nelle aree circostanti corsi d’acqua, laghi	●●	●●
			Esclusione di ipotesi insediative in prossimità delle aree costituenti i corridoi ecologici	●●	●●
			Realizzazione di greenbelts in adiacenza alle principali infrastrutture di trasporto	●●	●
		Ventilazione	Esclusione delle aree di valle, dei suoli collinari, di aree con pendenze accentuate (> 20%) e delle aree prossime ai grandi spazi aperti (battute da brezze di terra e di mare) da ipotesi insediative	●●	●●
			Forestazione delle aree naturali pedemontane, collinari e con pendenze accentuate per massimizzare il ricambio d’aria	●	●●
		Temperatura	Bonifica e conversione di discariche in superfici vegetate	●●	●
Area urbana	Piani Urbanistici Comunali (PUC)	Vegetazione	Parchi urbani in prossimità delle aree affette dal UHI molto intensa	●●	●
			Rinverdimento delle superfici destinate ad infrastrutture di trasporto urbane (ad es., sedi tranviarie)	●●	○

<div>●● azione efficace</div> <div>● azione moderatamente efficace</div> <div>○ azione non efficace</div>		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti		Efficacia rispetto al contesto climatico	
		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare			
		criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti			
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	Attenuazione del TL	Incremento del DP
Area urbana	Piani Urbanistici Comunali (PUC)	Ventilazione	Contenimento della diffusione insediativa e tutela delle aree agricole	●●	●
			Percorsi d'aria: favorire la connessione dei grandi spazi aperti e impedire l'interruzione di corridoi d'aria esistenti	●	●●
		Temperatura	Limitazione all'impermeabilizzazione dei suoli: concentrazione di eventuali nuovi insediamenti in aree produttive dismesse e/o suoli incolti in stretta continuità con le aree già urbanizzate	●●	●
			Limitazione all'insediamento di attività produttive ad elevata produzione di calore in aree affette dal UHI molto intensa	●●	○
			Limitazione all'insediamento di funzioni residenziali in prossimità di attività produttive ad elevata produzione di calore	●●	○
Area urbana	Piani Urbanistici Comunali (PUC)	Temperatura	Limitazione del traffico veicolare nelle aree affette dal UHI molto intensa	●	○
Quartiere / Vicinato	Piani Urbanistici Attuativi (PUA)	Albedo	Utilizzo di asfalti ad elevato albedo	●●	○
			Inserimento di specchi d'acqua all'interno degli spazi pubblici	●●	○

- azione efficace
- azione moderatamente efficace
- azione non efficace

		●● azione efficace		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti		Efficacia rispetto al contesto climatico
		● azione moderatamente efficace		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare		
		○ azione non efficace		criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti		
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	Attenuazione del TL	Incremento del DP	
Quartiere / Vicinato	Piani Urbanistici Attuativi (PUA)	Vegetazione	Incremento della <i>Sinergia</i> e della <i>Molteplicità</i> del sistema delle aree verdi: affiancare a parchi pubblici ed aree verdi di apprezzabile estensione, superfici vegetate di dimensioni contenute all'interno del tessuto urbanizzato, a distanza contenuta tra di loro	●●	●	
			Incremento della <i>Diffusione</i> del sistema delle aree verdi: creare spazi vegetati che si inseriscano in maniera pervasiva tra le superfici impermeabilizzate	●●	●	
		Vegetazione	Incremento della <i>Eterogeneità</i> del sistema delle aree verdi: creare un sistema di spazi verdi con forme ed estensioni differenti	●●	○	
			Incremento della <i>Continuità</i> del sistema delle aree verdi: connettere gli spazi vegetati tra loro	●●	●	
		Ombreggiamento	Piantumazione di alberi ad alto fusto e chioma larga per creare ombreggiatura lungo le strade principali e negli spazi pubblici (aree verdi, piazze, parcheggi)	●●	○	
		Ventilazione	Limitazione della <i>Frontal Area Density</i> : disposizione degli edifici - dimensione prevalente dei blocchi parallela alla direzione dei venti prevalenti	○	●●	
			Limitazione della <i>Frontal Area Density</i> : fronte degli edifici - limitare da dimensione delle facciate perpendicolari alla direzione dei venti prevalenti	○	●●	

- azione efficace
- azione moderatamente efficace
- azione non efficace

<div>●● azione efficace</div> <div>● azione moderatamente efficace</div> <div>○ azione non efficace</div>		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti		Efficacia rispetto al contesto climatico	
		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare			
		criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti			
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	Attenuazione del TL	Incremento del DP
Quartiere / Vicinato	Piani Urbanistici Attuativi (PUA)	Ventilazione	Limitazione della <i>Frontal Area Density</i> : altezza degli edifici - impedire sopraelevazioni oltre il livello medio delle cortine edilizie	●	●●
			Impedire l'installazione di grandi cartelli stradali o pubblicitari perpendicolari alla direzione dei venti prevalenti	○	●●
			Impedire la piantumazione di alberi ad alto fusto e chioma larga in successione, perpendicolari alla direzione dei venti prevalenti	○	●●
			Progettazione della griglia stradale disponendo le arterie principali parallelamente alla direzione dei venti prevalenti	●●	●●
			Creazione di percorsi d'aria: connessione degli spazi aperti con passaggi coperti	●	●●
		Temperatura	Minimizzazione dei fronti delle facciate esposte a ovest	●	○
			Controllo del valore di SVF: impedire allargamento dei fronti dell'edificio (vetrine sporgenti, incrementi volumetrici)	●●	●●
			Esclusione dei vuoti urbani da ipotesi di realizzazione di nuovi volumi	●●	●
			Conversione di spazi impermeabilizzati all'interno degli spazi pubblici in superfici permeabili o pavimenti water retentive (ad es. parcheggi)	●●	○

- azione efficace
- azione moderatamente efficace
- azione non efficace

●● azione efficace ● azione moderatamente efficace ○ azione non efficace		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti		Efficacia rispetto al contesto climatico	
		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare			
		criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti			
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	Attenuazione del TL	Incremento del DP
Isolato	Regolamento Urbanistico Edilizio Comunale (RUEC)	Albedo	Modifica delle pavimentazioni stradali mediante l'utilizzo di <i>cool pavements</i>	●●	○
		Vegetazione	Cura degli spazi verdi all'interno degli isolati e dei lotti privati mediante piantumazione di siepi e piante a basso fusto	●●	○
Edilizio	Regolamento Urbanistico Edilizio Comunale (RUEC)	Vegetazione	Conversione di spazi impermeabilizzati all'interno degli isolati e dei lotti privati in superfici vegetate	●●	●
		Ombreggiamento	Piantumazione di alberi ad alto fusto e chioma larga per creare ombreggiatura sulle facciate prospicienti le strade, in particolare su quelle esposte a sud e ad ovest	●●	○
		Ventilazione	Progettazione delle unità edilizie per la valorizzazione della ventilazione naturale	●●	●●
		Temperatura	Conversione di spazi impermeabilizzati all'interno degli isolati e dei lotti privati in superfici permeabili (ad es. parcheggi)	●●	●
		Albedo	Trattamento dei tetti con manti impermeabili specializzati e finiture superficiali riflettenti (<i>Cool Roofs</i>)	●	○
		Albedo	Utilizzo di verniciature protettive per superfici esterne ad azione fotocatalitica che garantiscono ottima idrorepellenza ed elevata permeabilità al vapore acqueo	●	○
		Vegetazione	Trasformazione dei tetti a “tetto verde intensivo” (giardino pensile) o a “tetto verde estensivo” (green Roofs)	●	○

- azione efficace
- azione moderatamente efficace
- azione non efficace

●● azione efficace ● azione moderatamente efficace ○ azione non efficace		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti		Efficacia rispetto al contesto climatico	
		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare			
		criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti			
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	Attenuazione del TL	Incremento del DP
Edilizio	Regolamento Urbanistico Edilizio Comunale (RUEC)	Ombreggiamento	Installazione di schermature verdi (alberi o piante rampicanti) per controllare il soleggiamento estivo	●●	○
			Schermatura delle aperture e/o dei serramenti verticali rivolti verso Sud e verso Ovest, così come dei serramenti orizzontali o inclinati mediante sistemi schermanti fissi (aggetti, brise soleil, balconi, porticati, frangisole fissi) o la installazione di schermi flessibili (ante mobili oscuranti, frangisole mobili, chiusure avvolgibili, tende esterne)	●●	○
		Ventilazione	Captazione di aria raffrescata da elementi naturali e/o facciate esposte alle brezze estive e/o da zona dell’edificio con aria raffrescata (patii, porticati, zona a nord, spazi cantinati, etc.),	●	●
			Utilizzo delle condizioni ambientali esterne e delle caratteristiche distributive degli spazi per favorire la ventilazione naturale degli ambienti	●	○
			Utilizzo di finestre a torrino sui tetti per incrementare la ventilazione naturale favorita dall’effetto camino	●	○
		Temperatura	Controllo del rapporto S/V dell’edificio (Superficie Disperdente/Volume Riscaldato) per ridurre le dispersione termiche sia in fase di progettazione volumetrica sia sugli edifici esistenti	●●	○

●● azione efficace ● azione moderatamente efficace ○ azione non efficace		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti		Efficacia rispetto al contesto climatico	
		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare			
		criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti			
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	Attenuazioni e del TL	Incremento del DP
Edilizio	Regolamento Urbanistico Edilizio Comunale (RUEC)	Temperatura	Rivestimento dell'involucro esterno con sistemi di isolamento termico per incrementare la resistenza termica e risolvere il problema dei ponti termici	●	○
			Utilizzo di facciate ventilate per la dissipazione del calore accumulato dagli elementi esterni e per la protezione da vento e pioggia	●	○
			Definire regole per la sostituzione dei serramenti negli interventi di manutenzione straordinaria e di ristrutturazione edilizia	●	○

Tabella B - Valutazione della fattibilità degli interventi rispetto alle caratteristiche urbanistiche del Climatopo 9..

✓✓ azione coerente e fattibile		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti		Fattibilità e coerenza in relazione alle caratteristiche urbanistiche
✓ azione coerente ma solo in parte fattibile		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare		
✗ azione non fattibile/non coerente		criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti		
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	
Area Vasta	Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP), Piano paesaggistico (PP), Piano del Parco (PDP)	Vegetazione	Protezione e rafforzamento dei corridoi ecologici: incremento della vegetazione nelle aree circostanti corsi d’acqua, laghi	✗
			Esclusione di ipotesi insediative in prossimità delle aree costituenti i corridoi ecologici	✗
			Realizzazione di greenbelts in adiacenza alle principali infrastrutture di trasporto	✗
		Ventilazione	Esclusione delle aree di valle, dei suoli collinari, di aree con pendenze accentuate (> 20%) e delle aree prossime ai grandi spazi aperti (battute da brezze di terra e di mare) da ipotesi insediative	✗
			Forestazione delle aree naturali pedemontane, collinari e con pendenze accentuate per massimizzare il ricambio d’aria	✗
		Temperatura	Bonifica e conversione di discariche in superfici vegetate	✗
Area urbana	Piani Urbanistici Comunali (PUC)	Vegetazione	Parchi urbani in prossimità delle aree affette dal UHI molto intensa	✗
			Rinverdimento delle superfici destinate ad infrastrutture di trasporto urbane (ad es., sedi tranviarie)	✓
		Ventilazione	Contenimento della diffusione insediativa e tutela delle aree agricole	✗
			Percorsi d’aria: favorire la connessione dei grandi spazi aperti e impedire l’interruzione di corridoi d’aria esistenti	✓
		Temperatura	Limitazione all’impermeabilizzazione dei suoli: concentrazione di eventuali nuovi insediamenti in aree produttive dismesse e/o suoli incolti in stretta continuità con le aree già urbanizzate	✗

✓✓ azione coerente e fattibile		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti		Fattibilità e coerenza in relazione alle caratteristiche urbanistiche
✓ azione coerente ma solo in parte fattibile		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare		
✗ azione non fattibile/non coerente		criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti		
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	
Area urbana	Piani Urbanistici Comunali (PUC)	Temperatura	Limitazione all’insediamento di attività produttive ad elevata produzione di calore in aree affette dal UHI molto intensa	✓
			Limitazione all’insediamento di funzioni residenziali in prossimità di attività produttive ad elevata produzione di calore	✗
			Limitazione del traffico veicolare nelle aree affette dal UHI molto intensa	✓✓
Quartiere / Vicinato	Piani Urbanistici Attuativi (PUA)	Albedo	Utilizzo di asfalti ad elevato albedo	✓✓
			Inserimento di specchi d’acqua all’interno degli spazi pubblici	✓✓
		Vegetazione	Incremento della <i>Sinergia</i> e della <i>Molteplicità</i> del sistema delle aree verdi: affiancare a parchi pubblici ed aree verdi di apprezzabile estensione, superfici vegetate di dimensioni contenute all’interno del tessuto urbanizzato, a distanza contenuta tra di loro	✓✓
			Incremento della <i>Diffusione</i> del sistema delle aree verdi: creare spazi vegetati che si inseriscano in maniera pervasiva tra le superfici impermeabilizzate	✓
			Incremento della <i>Eterogeneità</i> del sistema delle aree verdi: creare un sistema di spazi verdi con forme ed estensioni differenti	✓
			Incremento della <i>Continuità</i> del sistema delle aree verdi: connettere gli spazi vegetati tra loro	✓✓
		Ombreggiamento	Piantumazione di alberi ad alto fusto e chioma larga per creare ombreggiatura lungo le strade principali e negli spazi pubblici (aree verdi, piazze, parcheggi)	✓
		Ventilazione	Limitazione della <i>Frontal Area Density</i> : disposizione degli edifici - dimensione prevalente dei blocchi parallela alla direzione dei venti prevalenti	✗

✓✓ azione coerente e fattibile ✓ azione coerente ma solo in parte fattibile ✗ azione non fattibile/non coerente		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti		Fattibilità e coerenza in relazione alle caratteristiche urbanistiche
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	
Quartiere / Vicinato	Piani Urbanistici Attuativi (PUA)	Ventilazione	Limitazione della <i>Frontal Area Density</i> : fronte degli edifici - limitare da dimensione delle facciate perpendicolari alla direzione dei venti prevalenti	✗
			Limitazione della <i>Frontal Area Density</i> : altezza degli edifici - impedire sopraelevazioni oltre il livello medio delle cortine edilizie	✓
			Impedire l'installazione di grandi cartelli stradali o pubblicitari perpendicolari alla direzione dei venti prevalenti	✓✓
			Impedire la piantumazione di alberi ad alto fusto e chioma larga in successione, perpendicolari alla direzione dei venti prevalenti	✓
			Progettazione della griglia stradale disponendo le arterie principali parallelamente alla direzione dei venti prevalenti	✗
			Creazione di percorsi d'aria: connessione degli spazi aperti con passaggi coperti	✓
		Temperatura	Minimizzazione dei fronti delle facciate esposte a ovest	✗
			Controllo del valore di SVF: impedire allargamento dei fronti dell'edificio (vetrine sporgenti, incrementi volumetrici)	✓✓
			Esclusione dei vuoti urbani da ipotesi di realizzazione di nuovi volumi	✓✓
			Conversione di spazi impermeabilizzati all'interno degli spazi pubblici in superfici permeabili o pavimenti water retentive (ad es. parcheggi)	✓✓
Isolato	Regolamento Urbanistico Edilizio Comunale (RUEC)	Albedo	Modifica delle pavimentazioni stradali mediante l'utilizzo di cool pavements	✓✓
		Vegetazione	Cura degli spazi verdi all'interno degli isolati e dei lotti privati mediante piantumazione di siepi e piante a basso fusto	✓✓

✓✓ azione coerente e fattibile		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti		Fattibilità e coerenza in relazione alle caratteristiche urbanistiche
✓ azione coerente ma solo in parte fattibile		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare		
✗ azione non fattibile/non coerente		criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti		
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	
Isolato	Regolamento Urbanistico Edilizio Comunale (RUEC)	Vegetazione	Conversione di spazi impermeabilizzati all'interno degli isolati e dei lotti privati in superfici vegetate	✓✓
Edilizio	Regolamento Urbanistico Edilizio Comunale (RUEC)	Ombreggiamento	Piantumazione di alberi ad alto fusto e chioma larga per creare ombreggiatura sulle facciate prospicienti le strade, in particolare su quelle esposte a sud e ad ovest	✓
		Ventilazione	Progettazione delle unità edilizie per la valorizzazione della ventilazione naturale	✗
		Temperatura	Conversione di spazi impermeabilizzati all'interno degli isolati e dei lotti privati in superfici permeabili (ad es. parcheggi)	✓✓
		Albedo	Trattamento dei tetti con manti impermeabili specializzati e finiture superficiali riflettenti (Cool Roofs)	✓
			Utilizzo di verniciature protettive per superfici esterne ad azione fotocatalitica che garantiscono ottima idrorepellenza ed elevata permeabilità al vapore acqueo	✓
		Vegetazione	Trasformazione dei tetti a “tetto verde intensivo” (giardino pensile) o a “tetto verde estensivo” (green Roofs)	✓✓
		Ombreggiamento	Installazione di schermature verdi (alberi o piante rampicanti) per controllare il soleggiamento estivo	✓
			Schermatura delle aperture e/o dei serramenti verticali rivolti verso Sud e verso Ovest, così come dei serramenti orizzontali o inclinati mediante sistemi schermanti fissi (aggetti, brise soleil, balconi, porticati, frangisole fissi) o la installazione di schermi flessibili (ante mobili oscuranti, frangisole mobili, chiusure avvolgibili, tende esterne)	✓

✓✓ azione coerente e fattibile		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti		Fattibilità e coerenza in relazione alle caratteristiche urbanistiche
✓ azione coerente ma solo in parte fattibile		interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare		
✗ azione non fattibile/non coerente		criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti		
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	
Edilizio	Regolamento Urbanistico Edilizio Comunale (RUEC)	Ventilazione	Captazione di aria raffrescata da elementi naturali e/o facciate esposte alle brezze estive e/o da zona dell'edificio con aria raffrescata (patii, porticati, zona a nord, spazi cantinati, etc.),	✗
			Utilizzo delle condizioni ambientali esterne e delle caratteristiche distributive degli spazi per favorire la ventilazione naturale degli ambienti	✓
			Utilizzo di finestre a torrino sui tetti per incrementare la ventilazione naturale favorita dall'effetto camino	✗
		Temperatura	Controllo del rapporto S/V dell'edificio (Superficie Disperdente/Volume Riscaldato) per ridurre le dispersione termiche sia in fase di progettazione volumetrica sia sugli edifici esistenti	✓
			Rivestimento dell'involucro esterno con un sistemi di isolamento termico (es: a cappotto) per incrementare la resistenza termica e risolvere il problema dei ponti termici	✓
			Utilizzo di facciate ventilate per la dissipazione del calore accumulato dagli elementi esterni e per la protezione da vento e pioggia	✗
	Definire regole per la sostituzione dei serramenti negli interventi di manutenzione straordinaria e di ristrutturazione edilizia	✓✓		

Tabella C - Stima del grado di priorità degli interventi per il Climatopo 9.

interventi su edifici ed elementi urbani esistenti				Grado di priorità
interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare				
criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti				
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	
Area Vasta	Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP), Piano paesaggistico (PP), Piano del Parco (PDP)	Vegetazione	Protezione e rafforzamento dei corridoi ecologici: incremento della vegetazione nelle aree circostanti corsi d'acqua, laghi	NON FATTIBILE/NON COERENTE
			Esclusione di ipotesi insediative in prossimità delle aree costituenti i corridoi ecologici	NON FATTIBILE/NON COERENTE
			Realizzazione di greenbelts in adiacenza alle principali infrastrutture di trasporto	NON FATTIBILE/NON COERENTE
		Ventilazione	Esclusione delle aree di valle, dei suoli collinari, di aree con pendenze accentuate (> 20%) e delle aree prossime ai grandi spazi aperti (battute da brezze di terra e di mare) da ipotesi insediative	NON FATTIBILE/NON COERENTE
			Forestazione delle aree naturali pedemontane, collinari e con pendenze accentuate per massimizzare il ricambio d'aria	NON FATTIBILE/NON COERENTE
		Temperatura	Bonifica e conversione di discariche in superfici vegetate	NON FATTIBILE/NON COERENTE
Area urbana	Piani Urbanistici Comunali (PUC)	Vegetazione	Parchi urbani in prossimità delle aree affette dal UHI molto intensa	NON FATTIBILE/NON COERENTE
			Rinverdimento delle superfici destinate ad infrastrutture di trasporto urbane (ad es., sedi tranviarie)	BASSO
		Ventilazione	Contenimento della diffusione insediativa e tutela delle aree agricole	NON FATTIBILE/NON COERENTE

interventi su edifici ed elementi urbani esistenti				Grado di priorità
interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare				
criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti				
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	
Area urbana	Piani Urbanistici Comunali (PUC)	Ventilazione	Percorsi d'aria: favorire la connessione dei grandi spazi aperti e impedire l'interruzione di corridoi d'aria esistenti	MEDIO
		Temperatura	Limitazione all'impermeabilizzazione dei suoli: concentrazione di eventuali nuovi insediamenti in aree produttive dismesse e/o suoli incolti in stretta continuità con le aree già urbanizzate	NON FATTIBILE/NON COERENTE
			Limitazione all'insediamento di attività produttive ad elevata produzione di calore in aree affette dal UHI molto intensa	BASSO
			Limitazione all'insediamento di funzioni residenziali in prossimità di attività produttive ad elevata produzione di calore	NON FATTIBILE/NON COERENTE
			Limitazione del traffico veicolare nelle aree affette dal UHI molto intensa	BASSO
Quartiere / Vicinato	Piani Urbanistici Attuativi (PUA)	Albedo	Utilizzo di asfalti ad elevato albedo	MEDIO
			Inserimento di specchi d'acqua all'interno degli spazi pubblici	MEDIO
		Vegetazione	Incremento della Sinergia e della Molteplicità del sistema delle aree verdi: affiancare a parchi pubblici ed aree verdi di apprezzabile estensione, superfici vegetate di dimensioni contenute all'interno del tessuto urbanizzato, a distanza contenuta tra di loro	ALTO

interventi su edifici ed elementi urbani esistenti				Grado di priorità
interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare				
criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti				
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	
Quartiere / Vicinato	Piani Urbanistici Attuativi (PUA)	Vegetazione	Incremento della <i>Diffusione</i> del sistema delle aree verdi: creare spazi vegetati che si inseriscano in maniera pervasiva tra le superfici impermeabilizzate	MEDIO
			Incremento della <i>Eterogeneità</i> del sistema delle aree verdi: creare un sistema di spazi verdi con forme ed estensioni differenti	BASSO
			Incremento della <i>Continuità</i> del sistema delle aree verdi: connettere gli spazi vegetati tra loro	ALTO
		Ombreggiamento	Piantumazione di alberi ad alto fusto e chioma larga per creare ombreggiatura lungo le strade principali e negli spazi pubblici (aree verdi, piazze, parcheggi)	BASSO
		Ventilazione	Limitazione della <i>Frontal Area Density</i> : disposizione degli edifici - dimensione prevalente dei blocchi parallela alla direzione dei venti prevalenti	NON FATTIBILE/NON COERENTE
			Limitazione della <i>Frontal Area Density</i> : fronte degli edifici - limitare da dimensione delle facciate perpendicolari alla direzione dei venti prevalenti	NON FATTIBILE/NON COERENTE
			Limitazione della <i>Frontal Area Density</i> : altezza degli edifici - impedire sopraelevazioni oltre il livello medio delle cortine edilizie	MEDIO
			Impedire l'installazione di grandi cartelli stradali o pubblicitari perpendicolari alla direzione dei venti prevalenti	MEDIO

interventi su edifici ed elementi urbani esistenti				Grado di priorità
interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare				
criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti				
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	
Quartiere / Vicinato	Piani Urbanistici Attuativi (PUA)	Ventilazione	Impedire la piantumazione di alberi ad alto fusto e chioma larga in successione, perpendicolari alla direzione dei venti prevalenti	BASSO
			Progettazione della griglia stradale disponendo le arterie principali parallelamente alla direzione dei venti prevalenti	NON FATTIBILE/NON COERENTE
			Creazione di percorsi d'aria: connessione degli spazi aperti con passaggi coperti	MEDIO
		Temperatura	Minimizzazione dei fronti delle facciate esposte a ovest	NON FATTIBILE/NON COERENTE
			Controllo del valore di SVF: impedire allargamento dei fronti dell'edificio (vetrine sporgenti, incrementi volumetrici)	ALTO
			Esclusione dei vuoti urbani da ipotesi di realizzazione di nuovi volumi	ALTO
			Conversione di spazi impermeabilizzati all'interno degli spazi pubblici in superfici permeabili o pavimenti water retentive (ad es. parcheggi)	MEDIO
Isolato	Regolamento Urbanistico Edilizio Comunale (RUEC)	Albedo	Modifica delle pavimentazioni stradali mediante l'utilizzo di cool pavements	MEDIO
		Vegetazione	Cura degli spazi verdi all'interno degli isolati e dei lotti privati mediante piantumazione di siepi e piante a basso fusto	MEDIO
			Conversione di spazi impermeabilizzati all'interno degli isolati e dei lotti privati in superfici vegetate	ALTO

interventi su edifici ed elementi urbani esistenti				Grado di priorità
interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare				
criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti				
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	
Isolato	Regolamento Urbanistico Edilizio Comunale (RUEC)	Ombreggiamento	Piantumazione di alberi ad alto fusto e chioma larga per creare ombreggiatura sulle facciate prospicienti le strade, in particolare su quelle esposte a sud e ad ovest	BASSO
		Ventilazione	Progettazione delle unità edilizie per la valorizzazione della ventilazione naturale	NON FATTIBILE/NON COERENTE
		Temperatura	Conversione di spazi impermeabilizzati all'interno degli isolati e dei lotti privati in superfici permeabili (ad es. parcheggi)	ALTO
Edilizio	Regolamento Urbanistico Edilizio Comunale (RUEC)	Albedo	Trattamento dei tetti con manti impermeabili specializzati e finiture superficiali riflettenti (Cool Roofs)	BASSO
			Utilizzo di verniciature protettive per superfici esterne ad azione fotocatalitica che garantiscono ottima idrorepellenza ed elevata permeabilità al vapore acqueo	BASSO
		Vegetazione	Trasformazione dei tetti a “tetto verde intensivo” (giardino pensile) o a “tetto verde estensivo” (green Roofs)	BASSO
		Ombreggiamento	Installazione di schermature verdi (alberi o piante rampicanti) per controllare il soleggiamento estivo	BASSO

interventi su edifici ed elementi urbani esistenti				Grado di priorità
interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare				
criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti				
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	
Edilizio	Regolamento Urbanistico Edilizio Comunale (RUEC)	Ombreggiamento	Schermatura delle aperture e/o dei serramenti verticali rivolti verso Sud e verso Ovest, così come dei serramenti orizzontali o inclinati mediante sistemi schermanti fissi (aggetti, brise soleil, balconi, porticati, frangisole fissi) o la installazione di schermi flessibili (ante mobili oscuranti, frangisole mobili, chiusure avvolgibili, tende esterne)	BASSO
		Ventilazione	Captazione di aria raffrescata da elementi naturali e/o facciate esposte alle brezze estive e/o da zona dell’edificio con aria raffrescata (patii, porticati, zona a nord, spazi cantinati, etc.),	NON FATTIBILE/NON COERENTE
			Utilizzo delle condizioni ambientali esterne e delle caratteristiche distributive degli spazi per favorire la ventilazione naturale degli ambienti	BASSO
			Utilizzo di finestre a torrino sui tetti per incrementare la ventilazione naturale favorita dall’effetto camino	NON FATTIBILE/NON COERENTE
		Temperatura	Controllo del rapporto S/V dell’edificio (Superficie Disperdente/Volume Riscaldato) per ridurre le dispersione termiche sia in fase di progettazione volumetrica sia sugli edifici esistenti	BASSO
			Rivestimento dell’involucro esterno con un sistemi di isolamento termico (es: a cappotto) per incrementare la resistenza termica e risolvere il problema dei ponti termici	BASSO

interventi su edifici ed elementi urbani esistenti				Grado di priorità
interventi su edifici ed elementi urbani esistenti o da realizzare				
criteri di progettazione edilizia o di pianificazione urbanistica per nuovi insediamenti				
Scala di intervento	Strumento di pianificazione di riferimento	Aspetti	Azioni	
Edilizio	Regolamento Urbanistico Edilizio Comunale (RUEC)	Temperatura	Utilizzo di facciate ventilate per la dissipazione del calore accumulato dagli elementi esterni e per la protezione da vento e pioggia	NON FATTIBILE/NON COERENTE
			Definire regole per la sostituzione dei serramenti negli interventi di manutenzione straordinaria e di ristrutturazione edilizia	BASSO

ELENCO FIGURE

Figura 1 - Distribuzione della radiazione solare nel passaggio attraverso l'atmosfera.

Figura 2 - Andamenti annuali della temperatura per le città di Milano e Napoli. Sono rappresentate le temperature massime e minime mensili ricavate dai dati misurati nel trentennio 1971-2000 rispettivamente nelle stazioni meteorologiche degli aeroporti di Linate e Capodichino.

Figura 3 - Diagramma di frequenza, velocità e direzione del vento.

Figura 4 - Schematizzazione del comportamento di un flusso di vento che spira sul versante di una collina.

Figura 5 - Schematizzazione dell'asse eliotermico proposto da Rey (a), e dell'asse equisolare proposto da Vinaccia (b).

Figura 6 - Schema esemplificativo delle azioni da mettere in essere nell'ambito della mitigazione del CC (elaborazione su IPCC, 2015).

Figura 7 - Schema esemplificativo delle azioni da mettere in essere nell'ambito dell'adattamento al CC (elaborazione su IPCC, 2015).

Figura 8 - Esempi di alcune azioni concrete messe in atto nelle città afferenti alla rete C40 nell'ambito del proprio Piano di adattamento al *climate change*.

Figura 9 - Schema della struttura dell'ABL (Oke, 2006).

Figura 10 - Confronto tra il profilo logaritmico di velocità del vento in condizioni neutre (Stull, 1988) e in condizioni di suolo urbanizzato (WMO, 2006).

Figura 11 - Rappresentazione schematica delle equazioni di bilancio di calore e radiativo della superficie (elaborazione su Oke, 1987).

Figura 12 - Rappresentazione schematica del volume di controllo considerato per la realizzazione del bilancio energetico (Oke, 1987; Erell et al., 2011).

Figura 13 - Andamento diurno e notturno della temperatura superficiale ed atmosferica (elaborazione su Voogt, 2004).

Figura 14 - Modalità di rilevamento delle varie tipologie di UHI (Voogt, 2006).

Figura 15 - Rappresentazione schematica di un *canyon urbano* e delle riflessioni e degli assorbimenti multipli che si verificano al suo interno (elaborazione su Nunez e Oke, 1977).

Figura 16 - Rappresentazione schematica dello SVF (Unger, 2009).

Figura 17 - Principali strategie di mitigazione dell'UHI e relativa influenza sui termini del bilancio di energia della superficie.

Figura 18 - Sequenza delle fasi per la redazione di un Piano locale di adattamento climatico proposta dalle *Guidelines on developing adaptation strategies* (EC, 2013).

Figura 19 - Studi sulle UC-Map nel mondo (Ren, 2015).

Figura 20 - Struttura di una UC-Map (Ren, 2015).

Figura 21 - Diagramma di flusso del processo di redazione della UC-AnMap di Hong Kong (Ren et al., 2011).

Figura 22 - Quadro sinottico dei livelli informativi impiegati in casi studio internazionali nella redazione della UC-AnMap.

Figura 23 - Stralcio della UC-AnMap di Stoccarda e relativa legenda (Klimaatlas, 1992; VDI, 1997).

Figura 24 - Classificazione di tipi edilizi in base al *LCR* e al numero di piani dei fabbricati (Piccinato, 1988).

Figura 25 - Rappresentazione schematica del calcolo del *LCR* e della *BD*.

Figura 26 - Rappresentazione schematica delle tipologie di *canyon urbano*, classificate in base al valore dell'*Aspect Ratio H/W*.

Figura 27 - In alto, rappresentazione schematica di come strade dritte e parallele ai venti prevalenti favoriscano la ventilazione naturale all'interno dei tessuti urbani (elaborazione su Santamouris et. al, 1999). In basso, impatto dell'orientamento delle strade sul soleggiamento: percentuale della superficie stradale direttamente colpita dalla radiazione solare incidente quando la strada è orientata lungo la direttrice N-S (a), e E-O (b) per un *canyon urbano* di 5 metri di larghezza (Robins, Macdonald, 1999).

Figura 28 - Modello per lo scambio radiativo tra un elemento oggetto di studio di superficie ΔA e un muro di lunghezza finita (Johnson, Watson 1984).

Figura 29 - Rappresentazione schematica dello SVF, definito come la parte del cielo visibile Ω al di sopra di un certo punto di osservazione, come mostrato nella rappresentazione bidimensionale (a). L'algoritmo del software *Relief visualization tool* computa l'angolo di elevazione γ in n direzioni (8 in figura) entro un prestabilito raggio R (b) (Zakšek et al., 2011).

Figura 30 - Rappresentazione schematica dei parametri necessari per calcolare la PAI λp (a), e la FAI λf (b) (Gál, Sümeghy, 2007).

Figura 31 - Variazione del Rapporto di forma S/V al variare delle dimensioni e della forma di un edificio.

Figura 32 - Rappresentazione schematica del calcolo del LAI (Campbell, Reece, 2008).

Figura 33 – Crescita del valore di ED con l'aumentare della complessità delle *patch* presenti nell'area oggetto di esame.

Figura 34 - Variazione del CORE al variare della forma (a), della dimensione (b), e dell'*edge-depth* (c).

Figura 35 – Rappresentazione schematica della variazione dell'IJI, calcolato al livello *landscape*, al mutare della configurazione spaziale delle *class* di *patch*.

Figura 36 - Rappresentazione schematica della metodologia proposta.

Figura 37 - *Urban Climate Zone* secondo la classificazione proposta da Oke (Bonafè, 2006 su dati WMO, 2006).

Figura 38 - Inquadramento territoriale dell'area oggetto di studio.

Figura 39 - Visualizzazione di una porzione del DSM, relativa al quartiere Fuorigrotta di Napoli, in *ArcScene*.

Figura 40 - Termografia ad alta risoluzione, ricavata da processamento di immagini telerilevate con sensore aviotrasportato.

Figura 41 - Mappa dell'NDVI.

Figura 42 - Esempio delle tipologie di tessuto urbano analizzato confrontate con le corrispondenti termografie, mappe di uso del suolo e DSM.

Figura 43 - Il *tool* sviluppato è articolato nella seguente successione di comandi: (1) taglio del *raster* della termografia utilizzando il *layer* vettoriale del perimetro dell'area *test* ed esportazione attribuendo al *raster* di output il codice identificativo dell'area *test*; (2) applicazione del comando *calculate statistics* sul *raster* di *output* per il calcolo della temperatura media dell'area *test*; (3) attribuzione del valore di temperatura precedentemente calcolato al *layer* del perimetro dell'area *test* con il comando di *join* utilizzando come *field* comune il codice identificativo delle aree *test*; (4) iterazione delle precedenti operazione per tutte le aree *test*.

Figura 44 - Caratteristiche delle metriche di paesaggio calcolate con Fragstats 4.2, con indicazione degli indicatori che hanno mostrato una maggiore correlazione con la temperatura superficiale delle aree *test*.

Figura 45 - *Workflow* della metodologia implementata.

Figura 46 - Sezioni di censimento urbane.

Figura 47 - Rappresentazione dello SVF calcolato impostando un raggio di banda di 20 m.

Figura 48 - Abstract grafico dei metodi di scelta del numero di componenti principali. La scelta è ricaduta sul metodo dello *screeplot* secondo il quale il numero di componenti rilevanti è pari a 3.

Figura 49 - Grafico delle osservazioni e sovrapposizione del grafico delle variabili nel piano cartesiano delle componenti principali.

Figura 50 - Abstract grafico della *Cluster Analysis* effettuata con il metodo gerarchico di Ward.

Figura 51 - Risultato della *cluster analysis*.

Figura 52 - Uso del suolo delle aree non urbanizzate.

Figura 53 - Mappa di uso del suolo.

Figura 54 - Rappresentazione dei punteggi *WFTL* attribuiti alle zone della mappa del Carico Termico.

Figura 55 - Mappa dei picchi montuosi e delle incisioni vallive.

Figura 56 - Mappa dell'esposizione al vento.

Figura 57 - Mappa della prossimità agli spazi aperti.

Figura 58 - Mappa della velocità del vento.

Figura 59 - Direzione prevalente e frequenza dei venti prevalenti in 6 stazioni di rilevamento ubicate all'interno dell'area di studio (it.windfinder.com).

Figura 60 - Mappa del potenziale dinamico con pesi attribuiti alle zone individuate.

Figura 61 - Mappa della somma dei punteggi delle mappe del Carico Termico e del Potenziale Dinamico.

Figura 62 - Rappresentazione delle zone in un piano cartesiano per evidenziare la relazione tra la somma dei punteggi delle mappe del Carico Termico e del Potenziale Dinamico e la temperatura media superficiale (LST) delle zone selezionate nella porzione occidentale dell'area metropolitana.

Figura 63 - Rappresentazione del nuovo set di dati con i punteggi calibrati, in maniera tale da massimizzare il coefficiente di determinazione R^2 .

Figura 64 - Confronto fra la termografia e il sistema dei punteggi calibrati per le aree della porzione occidentale dell'area metropolitana di Napoli.

Figura 65 - Mappa della somma dei punteggi calibrati delle mappe del Carico Termico e del Potenziale Dinamico.

Figura 66 - Mappa dei climatopi.

Figura 67 - Mappa per l'adattamento ai cambiamenti climatici; tale elaborazione, attraverso cui individuare, le aree da assoggettare a determinate strategie, deve essere corredata di un sistema di scelta degli interventi prioritari da mettere in essere.

ELENCO TABELLE

Tabella 1 - Valori tipici della lunghezza di rugosità aerodinamica (Bonafè, 2006).

Tabella 2 - Valori tipici del Rapporto di Bowen (Stull, 1988).

Tabella 3 - Valori tipici di albedo ed emissività infrarossa di superfici naturali (Stull, 1988; Anthes et al., 1987).

Tabella 4 - Valori tipici di albedo ed emissività infrarossa di superfici artificiali (Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Civile - Università di Modena e Reggio Emilia).

Tabella 5 - Incidenza del flusso di calore immagazzinato rispetto alla radiazione netta rilevato per la città di Nagoya (JPN), al variare dell'uso del suolo, delle stagioni e dell'ora del giorno (Kato, 2007).

Tabella 6 - Analisi e fenomeni climatici in una UC-AnMap (Ren, 2015).

Tabella 7 - Valori tipici di NDVI per vari tipi di copertura (Holben et al., 1986).

Tabella 8 - Caratteristiche dei principali livelli informativi

Tabella 9 - Set di indicatori descrittivi della morfologia urbana selezionati per il caso studio in esame.

Tabella 11 - Indicatori di morfologia urbana calcolati nella redazione della UC-Map

Tabella 12 - Descrizione, interpretazione e numerosità dei *cluster*.

Tabella 13 - Distribuzione percentuale dell'area dei *cluster* rispetto alla superficie totale delle aree urbanizzate.

Tabella 14 - Sistema di punteggi attribuiti alle zone della mappa del Carico Termico.

Tabella 15 - Sistema di punteggi attribuiti alle zone della mappa del Potenziale Dinamico.

Tabella 15 - Sistema di punteggi calibrati attribuiti alle zone della mappa del Carico Termico.

Tabella 16 - Sistema di punteggi calibrati attribuiti alle zone della mappa del Potenziale Dinamico.

Tabella 17 - Criterio per l'individuazione dei climatopi a seconda del punteggio ottenuto dalla somma dei punteggi delle mappe del Carico Termico e del Potenziale Dinamico.

BIBLIOGRAFIA

- Alcoforado M.J., Andrade H., Lopes A., Vasconcelos J. (2009), "Application of climatic guidelines to urban planning: the example of Lisbon (Portugal)", *Landscape and Urban Planning*, vol. 90, pp. 56–65.
- Ali-Toudert F., H. Mayer H. (2006), "Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate," *Buildings and Environment*, vol. 41, pp. 94-108.
- Armson D., Stringer P., Ennos A. (2012), "The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area", *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 11, pp. 245–255.
- Arnold C. L., Gibbons C. J. (1996), "Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator", *Journal of the American Planning Association*, vol. 62, pp. 243–258.
- Aronin J. E. (1953), "Climate and Architecture", Reinhold Publishing Corporation, New York, USA.
- Baklanov A., Burzynski J., Christen A., Deserti M., De Ridder K., Emeis S., Joffre S., Karppinen A., Mestayer P., Middleton D., Piringer M., Tombrou M. (2004), "The urban surface energy budget and mixing height in European cities: data, models and challenges for urban meteorology and air quality", in *Final Report of Working Group 2 of COST-715 Action*, a cura di Piringer M., Joffre S.
- Batty M., Longley P. A. (1994) "Fractal Cities: a Geometry of Form and Function", Academic Press, London, UK and San Diego, USA.
- Baumüller J., Hoffmann U., Reuter U. (1992), "Climate Booklet for Urban Development", Stuttgart: Ministry of Economy Baden-Wuttemberg, Environmental Protection Department.
- Baumüller J., Reuter U. (1999), "Demands and Requirements on a Climate Atlas for Urban Planning and Design", Stuttgart: Office of Environmental Protection.
- Baumüller J. (2006), "Implementation of climatic aspects in urban development. The example Stuttgart", *Proceedings of PGBC Symposium*

- 2006: Urban Climate + Urban Greenery, The professional Green Building Council, Hong Kong, CHN.
- Bonafè G. (2006), “Microclima urbano: impatto dell’urbanizzazione sulle condizioni climatiche locali e fattori di mitigazione”.
- Botequila Leitão A., Miller J. Ahern J., McGarigal K. (2006), “Measuring Landscapes. A Planner’s Handbook”, Island Press, Washington, Covelo, USA, London, UK.
- Bottema M., Patrice G. Mestayer P. G. (1998), “Urban roughness mapping - validation techniques and some first results”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, voll. 74–76, pp. 163–173.
- Burian S. J., Brown M. J., Linger S. P. (2002), “Morphological Analyses Using 3D Building Databases. Los Alamos National Laboratory”, Los Angeles, CA, LA-UR-02-0781.
- C40 (2015a), “Climate Action in Megacities 3.0”. Disponibile online: https://issuu.com/c40cities/docs/cam_3.0_2015
- C40 (2015b), “Cities 100. 100 solutions for climate action in cities”. Disponibile online: <https://issuu.com/sustainia/docs/cities100?e=4517615/31305566>
- Campbell N., Reece J. (2008), “Biology 8th Edition”, Pearson Education, USA.
- Cain, D. H., Riitters, K., Orvis, K. (1997), “A multiscale analysis of landscape statistics”, *Landscape Ecology*, vol. 12, pp. 199-212.
- Carraro C., Mazzai A. (2015), “Il clima che cambia. Non solo un problema ambientale”, il Mulino, Bologna.
- Chapman L., Thornes J. E., Bradley A. V. (2002), “Sky-view factor approximation using GPS receivers”, *International Journal of Climatology*, vol. 22, pp. 615–621.
- Chen J.M., Black T.A., (1992). “Defining leaf-area index for non-flat leaves”, *Plant, Cell, and Environment*, vol. 15, pp. 421–429.
- Chen L., Ng E., An X., Ren C., Lee M., Wang U., He Z. (2010), “Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach”, *International Journal Of Climatology*, vol. 32, pp. 121-136.

- Chen L., Ng E. (2011), "Quantitative urban climate mapping based on a geographical database: a simulation approach using Hong-Kong as a case study", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 13, pp. 586–594.
- Cleugh H., Emmanuel R., Endlicher W., Erell E., McGranahan G., Mills G., Ng E., Nickson A., Rosenthal J., Steemer K. (2009), "Climate and sustainable cities: climate information for improved planning and management of mega cities (Needs and Capabilities Perspectives)", *World Climate Conference-3*, Geneva, CH.
- Climate Central (2013), *Le stranezze del clima. Che cosa sta cambiando, e perché*, Zanichelli, Bologna.
- Conzen M.R.G. (1960), "Alnwick, Northumberland: A Study in Town-plan Analysis", *Institute of British Geographers Publication 27*, George Philip, London, UK.
- Costello A. et al (2009), "Managing the health effecto of climate change", *The Lancet*.
- Cremonini L. (2005), "Lo spazio della Luce", a cura di, Alinea, Firenze.
- Cutini V. (2012), "Consumo del suolo o dissipazione della città? Una analisi spaziale del tessuto insediativo periurbano", *XXIII Conferenza Italiana di Scienze Regionali*.
- EC (2013), "Guidelines on developing adaptation strategies". Disponibile online: http://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation/what/docs/swd_2013_134_en.pdf
- Eliasson I. (2000), "The use of climate knowledge in urban planning", *Landscape and Urban Planning*, vol. 48, pp. 31–44.
- Erell E., Pearlmutter D., Williamson T. (2011), "Urban Microclimate. Design the Spaces Between Buildings ", Routledge, New York, USA.
- Esch M., van Bruin-Hordijk T., de Duijvestein K. (2007), "The influence of building geometry on the physical urban climate: a revival of 'light, air and space'", in *PLEA2007 – 24th Conference on Passive and Low Energy Architecture*.
- Forman R. T. T., Godron M. (1986), "Landscape Ecology", Wiley, New York, USA.

- Filpa A., Ombuen S. (2013), "Dalla Strategia Nazionale per l'Adattamento Climatico all'azione locale. Riflessioni sui percorsi da costruire", in "Pianificazione urbanistica e clima urbano. Manuale per la riduzione dei fenomeni di isola di calore urbano" a cura di Musco F., Fregolent L., Il Poligrafo, Padova.
- Gál T., Sümeghy Z. (2007), "Mapping the roughness parameters in a large urban area for urban climate applications", *Acta Climatologica ET Chorologica* vol. 40-41, pp. 27-36.
- Giordano F., Capriolo A., Mascolo R. A. (2013), "Planning for adaptation to climate change. Guidelines for municipalities", Life Project No LIFE08 ENV/IT/000436. Disponibile online:
http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=ACT_306-guidelinesversionefinale20.pdf
- Gupta R.K., Prasad T. S., Vijayan D. (2002), "Estimation of roughness length and sensible heat flux from WiFS and NOAA AVHRR data", *Advances in Space Research*, vol. 29, pp. 33-38.
- Gustafson E. J. (1998), "Quantifying landscape spatial pattern: What is the state of the art", *Ecosystems*, vol. 1, pp. 143-156.
- Haines-Young R., Chopping M. (1996), "Quantifying landscape structure: a review of landscape indices and their application to forested landscapes", *Progress in Physical Geography*, vol. 20, pp. 418-445.
- Heidrich O., Dawson R.J., Reckian D., Walsh C.L. (2013), "Assessment of the climate preparedness of 30 urban areas in the UK", *Climatic Change*, vol. 120(4), pp. 771-784.
- Holben B., Kimes D., Fraser R. S. (1986), "Directional reflectance response in AVHRR red and near-IR bands for three cover types and varying atmospheric conditions", *Remote Sensing of Environment*, vol. 19, pp. 213-236.
- IPCC (2001), "Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC", Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- IPCC (2007), "Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC", Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.

- IPCC (2013), "Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC", Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 1535 pp.
- IPCC (2014), "Summary for policymakers", in "Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC", Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- Johnson G. T., Watson I. D. (1984), "The determination of view factors in urban canyons", *Journal of Climatology and Applied Meteorology*, vol. 2, pp. 329-335.
- Jones P. D., Lister D. H., Li Q. (2008), "Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China", *Journal of Geophysical Research*, vol. 113.
- Kato S., Yamaguchi Y. (2007), "Estimation of storage heat flux in an urban area using ASTER data", *Remote Sensing of Environment*, vol. 110, pp. 1-17.
- Klimaatlas (1992), "Climate study for the area of the Stuttgart Regional Federation and bordering areas of the Stuttgart region", Landeshaupstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abteilung Stadtklimatologie: Stuttgart, DE.
- Kolokotsa D., Santamouris M., Zerefos S. C. (2013), "Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions", *Solar Energy*, vol. 95, pp. 118-130.
- Kwok Wai Wong J., Siu-Kit Lau L. (2013), "From the 'urban heat island' to the 'green island'? A preliminary investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of Hong Kong", *Habitat International*, vol. 39, pp. 25-35.
- Lynch K. (1960), "The image of the city", MIT press, Cambridge, USA.
- Li J., Song C., Cao L., Zhu F., Meng X., Wu J. (2011), "Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China", *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, pp. 3249-3263.
- Li H., Chen W., He W. (2015), "Planning of Green Space Ecological Network in Urban Areas: An Example of Nanchang, China", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 12, pp. 12889-12904.

- MA (2005), "Millennium Ecosystem Assessment - Strengthening Capacity to Manage Ecosystem Sustainability for Human Well-Being", Island Press.
- Mander Ü., Müllerb F., Wrbkac T. (2005), "Functional and structural landscape indicators: Upscaling and downscaling problems", *Ecological Indicators*, vol. 5, pp. 267-272.
- Matzarakis A., Mayer H. (2008), "Learning from the past: Urban climate studies in Munich", *Proceedings of th 5th Japanese – German Meeting on Urban Climatology*, pp. 271–276, Freiburg, DE.
- McGarigal K. Marks B. J. (1995), "FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure", Disponibile online: <http://www.umass.edu/landeco/pubs/mcgarigal.marks.1995.pdf>
- McGarigal K., Cushman S. A., Neel M. C., Ene, E. (2002), "FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps", Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Disponibile online: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
- McKittrick R. R., Michael P. J. (2007), "Quantifying the influence of anthropogenic surface processes and inhomogeneities on gridded global climate data", *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*.
- Menna M., Mercatini A.), Uttieri M., Buonocore B., Zambianchi E. (2008), "Wintertime transport processes in the Gulf of Naples investigated by HF radar measurements of surface currents", *Il nuovo cimento*, vol. 30, pp. 605-622.
- Mickwitz P., Beck S., Jensenm A., Pedersen A.B., Görg C., Melanen M., Ferrand N., Kuhlicke C., Kuindersma W., Máñez M., Reinert H., Bommel S. (2009), "Climate policy integration as a necessity for an efficient climate policy", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 6.
- Mills G. (2009), "Luke Howard, Tim Oke and the study of urban climates", *Eighth Symposium on the Urban Environment*.
- Mills G. (2015), "Chapter 1 – Introduction", in "The Urban Climatic Map for Sustainable Urban Planning" a cura di di Ng E., Ren C., Routledge, London, Uk.
- Ministero della Salute (2013). Disponibile online:

- <http://www.salute.gov.it/emergenzaCaldo/paginaInternaMenuEmergenzaCaldo.jsp?id=399&menu=ondate>.
- Morabito M., Crisci A., Messeri A., Raschi A., Maracchi G., Munafò M. (2016), "The impact of built-up surfaces on land surface temperatures in Italian urban areas", *Science of the Total Environment*, voll. 551-552, pp. 317-326.
- Montini Zimolo P. (2008), "Abitare il Mediterraneo. Il difficile equilibrio tra utilità e bellezza".
- Moudon A. V. (1997), "Urban Morphology a san emerging interdisciplinary field", *Urban Morphology*, vol. 1, pp. 3-10.
- Muller R. A. (2012), "The Conversion of a Climate-Change Skeptic". Disponibile online:
http://www.nytimes.com/2012/07/30/opinion/the-conversion-of-a-climate-change-skeptic.html?_r=0
- Ng E., Ren C., Katzschnher L., Yau R. (2009), "Urban climatic studies for hot and humid tropical coastal city of Hong Kong", *Proceedings of the 7th International Conference on Urban Climate*, Yokohama, JPN.
- Nunez M., Oke T.R. (1977), "The Energy Balance of an Urban Canyon", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 16, pp. 11-19.
- Oke, T.R. (1981a), "The surface energy budgets of urban areas. In: *Modeling the Urban Boundary Layer*", AMS, Boston.
- Oke TR. (1981b), "Canyon geometry and the nocturnal heat island: comparison of scale model and field observations", *Journal of Climatology*, vol. 1, pp. 237-254.
- Oke T.R.(1987), "Boundary Layer Climates", pp. 262-303, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Oke, T.R. (2006), "Towards better scientific communication in urban climate", *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 84, pp. 179-190.
- Pedrini A. (1905), "La città moderna. Ad uso degli Ingegneri, dei Sanitari e degli Uffici Tecnici di Pubbliche Amministrazioni", Hoepli, Editore-Libraio della Real Casa, Milano.
- Piccinato L. (1988), "La progettazione urbanistica. La città come organismo", a cura di Astengo G., Marsilio Editori, Venezia.

- Radhi H., Fikry F., Sharples S. (2013), "Impacts of urbanisation on the thermal behaviour of new built up environments: A scoping study of the urban heat island in Bahrain", *Landscape and Urban Planning*, vol. 113, pp. 47-61.
- Ren C., Ng E., Katzschner L. (2011), "Urban climatic map studies: a review", *International Journal of Climatology*, vol. 31, pp. 2213–2233.
- Ren C. (2015), "Chapter 2 – A review of the historical development of urban climatic studies", in "The Urban Climatic Map for Sustainable Urban Planning" a cura di di Ng E., Ren C., Routledge, London, Uk.
- Rey A. A., Pidoux J., Barde C. (1928). "La science des plans de villes: ses applications a la construction, a l'extension, a l'hygiene, et a la beaute des villes, orientation solaire des habitations", Ed. Dunod.
- Rigotti G. (1952), "Urbanistica. La composizione", Utet, Torino.
- Riitters K. H., O'Neill R. V., Hunsaker C. T., Wickham J. D., Yankee D. H., Timmins K. B. J., Jackson B. L. (1995), "A factor analysis of landscape pattern and structure metrics", *Landscape Ecology*, vol. 10, pp. 23-39.
- Robins A., Macdonald R. (1999), "Review of Flow and Dispersion in the Vicinity of Buildings," Atmospheric Dispersion Modeling Liaison Committee Annual Report.
- Rotach, M.W. (1992), "Determination of the zero plane displacement in an urban environment", *Boundary-Layer Meteorology* vol. 67, pp. 187-193.
- Salamanca F., Georgescu M., Mahalov A., Moustauoui M., Wang M. (2014), "Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 119, pp. 5949–5965.
- Salat S., Labbé F., Nowacki C. (2011), "Cities and Forms: On Sustainable Urbanism", Herman, Paris.
- Santamouris M., Papanikolaou N., Koronakis I., Livada I., Asimakopoulos D. (1999), "Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions," *Atmospheric Environment*, vol. 33, pp. 4503-4521.
- Santamouris M. (2001), "Energy and Climate in the Urban Built Environment", James&James Science Publishers Ltd, London, UK.
- Sasso U. (2001), "Bioedilizia e bioarchitettura", in AA. VV., *Costruire sostenibile*, Alinea, Firenze.

- Scarano M., Sobrino J.A. (2015), "On the relationship between the sky view factor and the land surface temperature derived by Landsat-8 images in Bari, Italy", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 36, pp. 4820-4835.
- Scherer D., Fehrenbach U., Beha H. D., Parlow E. (1999), "Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning process", *Atmospheric Environment*, vol 33, pp. 4185-4193.
- Scudo G. (2009), "Presentazione – Criteri per la progettazione", in Zappone C., "La serra solare", Sistemi Editoriali, Napoli.
- Shishegar N. (2009), "Street Design and Urban Microclimate: Analyzing the Effects of Street Geometry and Orientation on Airflow and Solar Access in Urban Canyons", *Journal of Clean Energy Technologies*, vol. 1, pp. 52-56.
- Stanganelli M., Soravia M. (2012), "Connections between Urban Structure and Urban Heat Island Generation: An Analysis through Remote Sensing and GIS", in *The 12th International Conference on Computational Science and Its Applications*, a cura di B. Murgante et al., Part II, LNCS 7334, pp. 599–608.
- Stanhill G., Kalma J. D. (1995), "Solar dimming and urban heating at Hong Kong", *International Journal of Climatology*, vol 15, pp. 933-941.
- Stern N. (2007), "The economics of climate change. The Stern Review", Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- Stull R. B. (1988), "An Introduction to Boundary Layer Meteorology", Dordrecht, Boston, London.
- Susca T., Gaffin S. R., Dell’Osso G. R. (2011), "Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs", *Environmental Pollution*, vol. 159, pp. 2119-2126.
- Sutton P. C., Anderson S. J., Elvidge C. D. (2009), "Paving the planet: impervious surface as proxy measure of the human ecological footprint", *Progress in Physical Geography*, vol. 33, pp. 510–527.
- Swart R., Bernstein L., Ha-Duong M., Petersen A. (2009), "Agreeing to disagree: uncertainty management in assessing climate change, impacts and responses by the IPCC", *Climatic Change*, vol. 92(1), pp. 1-29
- Taleb D., Abu-Hijleh B. (2013), "Urban heat islands: Potential effect of organic and structured urban configurations on temperature variations in Dubai, UAE", *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 747-762.

- Tan Z., Ka-Lun Lau K., Ng E. (2015), "Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment", *Energy and Buildings*, vol. 114, pp. 265-274.
- Tombazis A. (2001), "La progettazione bioclimatica è solo un'opzione o è destinata a perdurare?", in "Costruire sostenibile. Il Mediterraneo" a cura di Carlo Monti, Maria Rosa Ronzoni, Riccardo Roda, Alinea, Firenze
- UN (1992), "United Nations Framework Convention On Climate Change", United Nations, Rio de Janeiro.
- UNISDR (2015), "Making development sustainable, the future of disaster risk management. Global assessment report on disaster risk reduction", Ginevra, CH.
- Unger J. (2009) "Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database", *International Journal of Environment and Pollution*, vol. 36, pp. 59 - 80.
- US EPA, "Urban Heat Island impacts". Disponibile online:
<https://www.epa.gov/heat-islands/>
- Van Nieuwaal K., Driessen P., Spit T., Termeer C. (2009), "A State of the Art of Governance Literature on Adaptation to Climate Change: Towards a Research Agenda", Report No. 003/2009, Knowledge for Climate (KfC), KfC Secretariat, Utrecht University, Utrecht, Netherlands.
- VDI (1997), "VDI-Standard: VDI 3787 Part 1 Environmental Meteorology. Climate and Air Pollution Maps for Cities and Regions", Beuth Verlag, Berlin, DE.
- Vinaccia G. (1940), "Come il clima plasma la forma urbana e l'architettura, la sanità e l'igiene cittadina", Palombi, Roma.
- Voogt J. A. (2004), "Urban heat islands: hotter cities", American Institute of Biological Sciences: Reston, VA, USA. Disponibile online:
www.actionbioscience.org/environment/voogt.html?newwindow=true
- Voogt J. A. (2006), "How Researchers Measure Urban Heat Islands", US EPA.
- Watson, I. D., Johnson, G. T. (1987), "Graphical estimation of sky view-factors in urban environments", *International Journal of Climatology*, vol. 7, pp. 193-197.

- WB (2010), "Cities and Climate Change: an Urgent Agenda", Urban Development Series – Knowledge Papers.
- Wickham J. D., Riitters K. H. (1995), "Sensitivity of landscape metrics to pixel size", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, pp. 3585-3595.
- Whitehand J. W. R. (2007), "Conzenian urban morphology and urban landscapes", *Proceedings, 6th International Space Syntax Symposium*, Istanbul.
- WMO (World Meteorological Organisation) (2006), "Guide to meteorological instruments and methods of observation", Settima edizione, preliminare.
- Yuan C. (2015), "Chapter 9 - Urban climatic map studies in China. Wuhan", in "The Urban Climatic Map for Sustainable Urban Planning" a cura di di Ng E., Ren C., Routledge, London, Uk.
- Zakšek K., Oštir K., Kokalj Ž. (2011), "Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique", *Remote Sensing*, vol. 3, pp. 398-415.